



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VLIV VLHKOSTI DŘEVA NA PRODUKCI PLYNNÝCH EMISÍ**

IMPACT OF WOOD MOISTURE ON GAS EMISSIONS PRODUCTION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Tomáš Kantor

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

**BRNO 2017**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Tomáš Kantor**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Vliv vlhkosti dřeva na produkci plyných emisí**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Malé zdroje znečišťování ovzduší spalující tuhá paliva se v celorepublikovém měřítku významně podílejí na znečišťování ovzduší. Pro možnost snížení emisí z malých spalovacích zařízení je potřeba si nejprve definovat parametry, které nejvíce ovlivní tvorbu emisí. Jedním ze základních parametrů, které tyto hodnoty mohou zásadně ovlivňovat je vlhkost použitého paliva.

### **Cíle bakalářské práce:**

Zpracovat rešerši spalování biomasy se zaměřením na vliv vlhkosti.

Provést základní spalovací zkoušky.

Porovnat výsledky naměřených emisí a porovnat je s platnými emisními limity, vyhodnotit vliv vlhkosti na dosažené hodnoty.

### **Seznam doporučené literatury:**

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447707.

PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.

MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá vlivem vlhkosti dřeva na produkci plyných emisí. Teoretická část je tvořena rešeršní studií zabývající se pojmem biomasa v kontextu tuhých paliv a spalováním biomasy. V experimentální části jsou v krbové vložce provedeny spalovací zkoušky pro dřevo různých vlhkostí. Na závěr jsou výsledky porovnány s platnými emisními limity a legislativou.

## **Klíčová slova**

Biomasa, tuhá paliva, dřevo, vlhkost, emise, spalovací zkouška, legislativa, emisní limity, krbová vložka

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with effect of wood moisture on production of gaseous emissions. Theoretical part is composed by background research dealing with a concept of biomass as a solid fuel and biomass combustion. In practical part, the combustion tests in a fireplace inlay are performed for wood of different moisture content. In conclusion, results are compared with valid emission limits and legislation.

## **Keywords**

Biomass, solid fuels, wood, moisture, emissions, combustion test, legislation, emission limits, fireplace inlay



## **Bibliografická citace**

KANTOR, T. *Vliv vlhkosti dřeva na produkci plyných emisí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.





### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Lisého, Ph.D. a s použitím zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....  
Tomáš Kantor



## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Lisému, Ph.D za odborné vedení mé bakalářské práce, cenné rady a připomínky a panu Ing. Otakaru Štelcovi za pomoc při měření. Poděkování patří i mým rodičům, kteří mi studium umožnili a plně mě v něm podporují. V neposlední řadě děkuji všem přátelům a známým, kteří mi pomáhali s korekturou práce.



## OBSAH

1	Úvod.....	15
2	Tuhá paliva.....	17
2.1	Složení .....	17
2.2	Vlhkost v palivu.....	17
2.3	Popelovina v palivu .....	17
2.4	Hořlavina v palivu .....	18
2.5	Spalování .....	19
2.5.1	Dokonalé spalování .....	19
2.5.2	Nedokonalé spalování .....	19
2.6	Vlastnosti .....	19
2.6.1	Spalné teplo .....	20
2.6.2	Výhřevnost .....	20
3	Biomasa.....	21
3.1	Dělení biomasy .....	21
3.1.1	Dělení dle původu .....	21
3.1.2	Dělení dle způsobu získávání .....	21
3.2	Charakteristické vlastnosti biomasy .....	21
3.2.1	Vlhkost .....	22
3.2.2	Popelovina.....	22
3.2.3	Hořlavina .....	22
3.2.4	Výhřevnost .....	22
3.3	Spalování biomasy.....	22
3.3.1	Emise při spalování biomasy.....	23
4	Vlhkost a její vliv na spalování biopaliv.....	25
4.1	Vliv vlhkosti na výhřevnost.....	25
4.2	Vliv vlhkosti na emise .....	26
5	Stanovení vlhkosti dřeva.....	29
5.1	Přímé (absolutní) metody měření vlhkosti .....	29
5.2	Nepřímé (relativní) metody měření vlhkosti .....	30
6	Sušení dřeva .....	31
6.1	Skladování dřeva .....	32
7	Zařízení pro spalování biomasy .....	33
7.1	Lokální vytápění dřevem .....	33
7.2	Druhy kotlů .....	33
7.3	Vliv vlhkosti na provoz kotle .....	35
7.4	Průzkum trhu s kotli na dřevo pro lokální vytápění .....	35
7.5	Průzkum trhu s krbovými vložkami .....	36
8	Experimentální část.....	37
8.1	Spalovací zkouška .....	37
8.2	Použitá technika.....	38
8.3	Průběh a výsledky měření.....	40

8.4	Emisní třídy a limity .....	46
8.5	Vyhodnocení.....	47
9	Závěr .....	49
	Použité zdroje.....	51
	Seznam obrázků .....	53
	Seznam tabulek .....	55
	Seznam použitých symbolů a zkratk .....	57

## 1 Úvod

Se zvyšující se spotřebou energií a rostoucími nároky na jejich ekologickou výrobu je stále větší poptávka po alternativních zdrojích k fosilním palivům, které se v současnosti podílí na velké většině výroby elektrické a tepelné energie. Je zde však dlouhodobé snažení tento zdroj energie nahrazovat zdroji ekologickými a obnovitelnými. Biomasa je jedno z těchto paliv, které dané požadavky splňují, a tak je potenciál využití biomasy k energetickým účelům stále obrovský. Tomu v posledních letech nasvědčují také dotační programy Ministerstva životního prostředí a Evropské unie.

Biomasa jako zdroj tepelné energie je známa po tisíciletí. V současné době s moderními technologiemi, nenáročností obsluhy a finanční dostupností je, a stále v blízké budoucnosti bude, její využití na vzestupu. Využitím biomasy na bázi dřeva se v současnosti vyrábí přes 10 % světové energie s tím, že ve výrobě tepla světovým číslům vévodí především rozvojové země [29]. V České republice má biomasa na hrubé výrobě elektrické energie podíl přibližně 2,5 %, na výrobě tepla asi 9 % z celkové produkce. Vzhledem ke geografické poloze a klimatickým podmínkám je biomasa pro ČR ideální alternativou [30].

Spalováním biomasy se emituje do ovzduší přibližně stejné množství  $\text{CO}_2$ , jaké byla rostlina schopna pojmout při fotosyntéze během svého růstu. Tato nulová emisní bilance však není pravidlem. Kvalita spalovacího procesu závisí na kvalitě paliva, použité technologii, údržbě zařízení a odbornosti obsluhy. Všechny tyto aspekty mohou ovlivnit pozitivně i negativně spalování biomasy a tvorbu emisí, a proto je třeba se jimi dále zabývat. Například vysoká vlhkost v palivu se může výrazně podepsat na složení spektra spalín a změnit tak pohled na ekologičnost celého procesu. Ve vyspělých zemích světa, včetně České republiky, existuje legislativa a normy vztahující se ke spalování biomasy a ochraně ovzduší. Většinu z hlavních aspektů spalování lze tedy skrze tyto zákony pozitivně ovlivnit.

Cílem této práce bude zpracování rešerše o biomase v kontextu tuhých paliv a její spalování. Rešerše se dále bude zaměřovat na emise vzniklé spalováním biomasy a vliv vlhkosti na jejich produkci. V praktické části bude cílem provést základní spalovací zkoušky a ověřit tvrzení v experimentální části o vlivu vlhkosti na produkci emisí. Výsledky budou vyhodnoceny a porovnány s platnými emisními normami.





## 2 Tuhá paliva

Podle původu se tuhá paliva dělí na:

- Fosilní – těžená paliva, též "neobnovitelná", mezi která řadíme například uhlí a ropu
- Obnovitelná – biomasa rostlinného nebo živočišného původu
- Alternativní – odpadní produkty především lidské činnosti (odpady zemědělské, průmyslové, komunální, kaly z čistíren atd.) a tuhá alternativní paliva (TAP)<sup>1</sup>

### 2.1 Složení

Složení tuhých paliv se určuje:

- Hrubým rozbořem – určuje poměr mezi hořlavinou, popelovinou a vodou obsaženou v tuhém palivu [1]

$$h + A^r + W^r = 100 \% \quad (1)$$

$h$  [%] – hmotnostní obsah hořlaviny

$A^r$  [%] – hmotnostní obsah popeloviny

$W^r$  [%] – hmotnostní obsah vody

Složky hrubého rozboru jsou pro zjednodušení zobrazeny v tab. 1. Popelovinu a vodu lze, jakožto látky bez potřebného energetického zisku, nazvat balastem (přítěží). Čím méně balastu palivo obsahuje, tím je kvalitnější.

přimísená voda	← Surové uhlí →		
	voda $W^r$	popeloviny $A^r$	hořlavina $h$
přítěž (balast)		prchavý podíl	tuhý podíl
		bezvodé uhlí (sušina)	
spálením vznikne:			
vodní pára	tuhé zbytky – škvára (struska), popílek		spaliny

Tab. 1 – Hrubý rozbor paliva (pro surové uhlí) [14]

- Elementárním obsahem hořlaviny s poměrnými obsahy prvků hořlaviny

### 2.2 Vlhkost v palivu

Vlhkost je podíl obsahu vody obsažené v palivu. Podíl ostatních složek nazýváme souhrnným názvem sušina. V tuhých palivech je voda vždy obsažena a je nežádoucí jakožto nehořlavá složka. Její obsah v palivu je proměnlivý, závisející na mnoha faktorech (např. na druhovém původu biopaliva, na geologickém stáří uhlí atd.). Obsah vody lze, na rozdíl od dalších složek paliva, velice dobře snížit (sušením). Může být v palivu obsažena různými způsoby.

### 2.3 Popelovina v palivu

Popelovinu v palivu tvoří minerální látky (křemičitany, uhličitany atd.). Kromě nich se do popelovin počítají i látky k palivu přimísené ať už během těžby, zpracování, skladování

<sup>1</sup> Paliva vyrobená z nerecyklovatelných odpadů

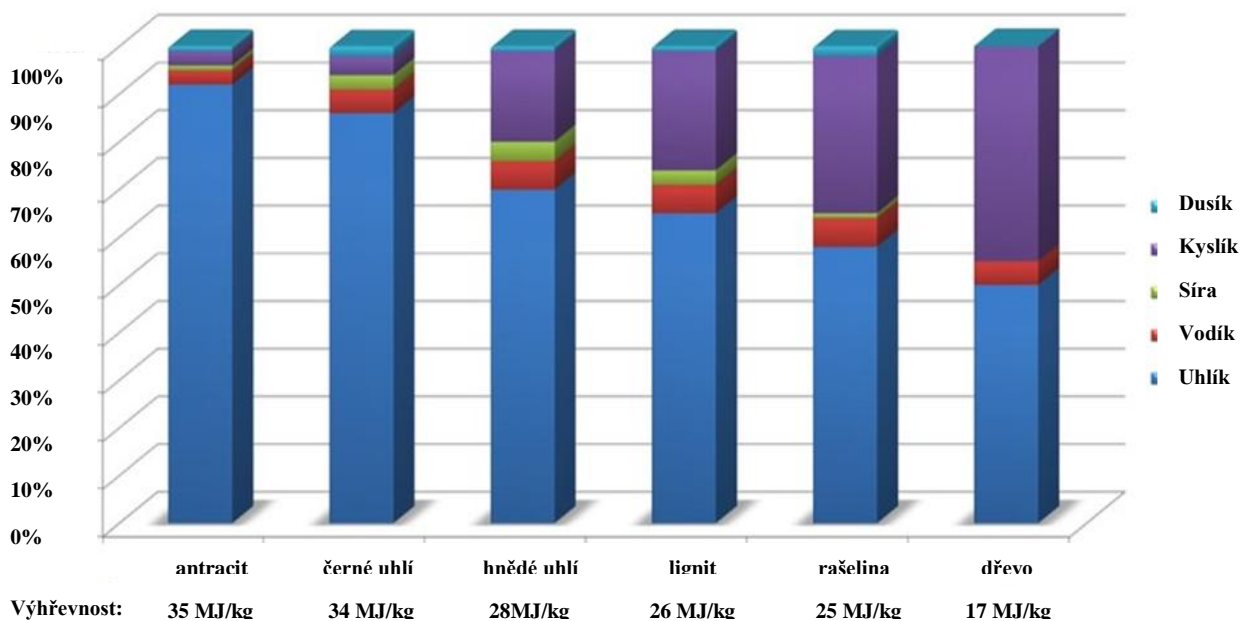
nebo převozu (hlína, písek apod.). Přibližně se popelovina v palivu (popř. přimísená k palivu) rovná obsahově i složením tuhému zbytku po jeho spalení [1].

Obsah popelovin lze na rozdíl od vody jen stěží snížit. Popelovina v palivu stěžuje přístup kyslíku k hořlavině. S nižším obsahem popelovin potom klesají emise tuhých částic (TZL<sup>2</sup>) ve spalínách a snižuje se náročnost údržby (odstraňování tuhých zbytků po spalování). Částice popelu se také usazují na teplosměnných plochách, čímž se zhoršuje přenos tepla v kotli a roste komínová ztráta i vlivem nedostatečného ochlazení spalin.

## 2.4 Hořlavina v palivu

Organická složka paliva (hořlavina) je nositelem tepelné energie uvolněné při spalování. Skládá se z pěti základních prvků: uhlík (C), vodík (H), kyslík (O), dusík (N) a síra (S). Uhlík, vodík a síra jsou aktivní prvky hořlaviny, které zásadně ovlivňují spalovací proces. Jsou nositeli chemicky vázané energie, která se při jejich spalování (oxidaci) uvolňuje ve formě tepla. Kyslík a dusík nepřináší energetickou hodnotu a jsou tak pasivními prvky hořlaviny. Ovlivňují však vznik znečišťujících látek (oxidů dusíku - NO<sub>x</sub> a oxidu siřičitého - SO<sub>2</sub>) [6].

Charakteristikou paliva je rovněž prchavá hořlavina. Uvolňuje se na začátku spalování (nad 250 °C) v podobě hořlavých plynů a napomáhá vznícení paliva a stabilizaci spalovacího procesu. Pokud prchavá hořlavina neshoří, odchází se spalinami a způsobí tak ztrátu kotle chemicky nedokonalým spalováním (chemickým nedopalem) [1].



Obr. 1 – Složení hořlaviny vybraných paliv[6]

Složení hořlaviny je proměnlivé v závislosti na druhu paliva a jeho stáří (viz obr. 1). „Mladá“ paliva (biomasa) se vyznačují malým množstvím uhlíku (cca 45 %) a vyšším obsahem prchavé hořlaviny, tudíž se lépe zapalují a hoří větším plamenem [6].

<sup>2</sup> TZL – Tuhé znečišťující látky (prachy; ang. Particulate matter, PM) – jedná se o částice od 0,1 µm do 5 mm. Pro lidské zdraví tvoří největší riziko částice v rozmezí 0,25 až 5 µm, protože narušují samočistící schopnost plic.

## 2.5 Spalování

Spalování je chemický pochod, při kterém spolu reagují hořlavé prvky v palivu s kyslíkem a výsledkem je uvolnění tepla. Při spalování se rozlišují chemické reakce exotermické a endotermické.

- Exotermická reakce – reakce slučování hořlavých prvků s kyslíkem za současného uvolňování tepla
- Endotermická reakce – reakce, která probíhá jen za přívodu tepla

Vstupními pracovními látkami spalovacího procesu jsou palivo a okysličovadlo (látky obsahující kyslík, např. vzduch). Výstupními produkty pak jsou spaliny a tuhý zbytek, vzniklé důsledkem chemické reakce vstupních látek.

Důležité pro spalování je také chování popela, které určují hlavně charakteristické teploty sintrace<sup>3</sup>, měknutí, tavení a tečení. Ty jsou určovány například pozorováním deformace zkušebního tělíska. Charakteristické teploty popela jsou přímo ovlivňovány složením paliva [1].

### 2.5.1 Dokonalé spalování

Označit spalování za dokonalé lze tehdy, pokud veškerá hořlavina shoří. Jeden z hlavních předpokladů tedy je, že spalovací proces musí proběhnout za dostatečného množství vzduchu. Pro dokonalé spalování platí následující stechiometrické vztahy [1]:

- Spalování uhlíku na oxid uhličitý –  $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{teplo}$  (2)
- Spalování vodíku na vodní páru –  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{teplo}$  (3)
- Spalování síry na oxid siřičitý –  $S + O_2 \rightarrow SO_2 + \text{teplo}$  (4)

Dusík, který je ve vzduchu obsažen se samotné reakce neúčastní. Přechází jako balastní složka do spalin nebo se slučuje s kyslíkem na škodlivé látky NO a NO<sub>2</sub>.

### 2.5.2 Nedokonalé spalování

Když nedochází k úplné oxidaci paliva, hovoříme o spalování nedokonalém. Hořlavé složky pak unikají společně se spaliny [1].

- Nedokonalé spalování uhlíku –  $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + \text{teplo}$  (5)

Přítomnost nespáleného uhlíku se projevuje černým popelem, černými sazemi a popílkem v komíně. Nedokonalé spalování lze také identifikovat dle přítomnosti produktů, které jsou pro něj typické, jako například CO nebo polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU<sup>4</sup>) [6].

## 2.6 Vlastnosti

Mezi sledované vlastnosti paliva patří spalné teplo, výhřevnost, poměrný obsah síry, melitelnost paliva (schopnost dělení), zrnění paliva (velikost zrn), měrná hmotnost atd. [1].

Nejdůležitější z nich jsou spalné teplo a výhřevnost, které vyjadřují množství chemicky vázaného tepla (v MJ nebo MWh), které se uvolní při dokonalém spálení jednotkové hmotnosti paliva [6].

<sup>3</sup> Sintrace – spékání

<sup>4</sup> PAU (nebo také PAH z anglického polyaromatic hydrocarbons) – jde o skupinu aromatických uhlovodíků s nejméně dvěma benzenovými jádry

## 2.6.1 Spalné teplo

„Spalné teplo je definováno jako teplo, které se uvolnilo při spálení jednotkového množství paliva s tím, že produkty spalování (spaliny) jsou ochlazeny na původní teplotu paliva, takže veškerá voda obsažená ve spalinách zkondenzuje a na konci experimentu je v kapalném stavu“ [6]. Pro výpočet se používá rovnice: [1]

$$Q_s = \frac{V \cdot \Delta T}{G} [\text{kJ/kg}] \quad (6)$$

$Q_s$  [kJ/kg] – spalné teplo

$V$  [kJ/K] – vodní hodnota kalorimetru

$G$  [kg] – hmotnost paliva

Spalné teplo se určuje experimentálně v kalorimetrech<sup>5</sup>.

## 2.6.2 Výhřevnost

U výhřevnosti se počítá s tím, že voda ve spalinách nezkondenzuje a zůstane v plynném stavu, přestože byly spaliny ochlazeny na původní teplotu. Neuvolní se tedy skupenské teplo vody. Jedná se tak pouze o teoretický stav, který v praxi nelze změřit, proto se výhřevnost vypočítá pomocí změřeného spalného tepla [6]. Výpočet lze provést podle rovnice [1].

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (7)$$

$Q_i^r$  [kJ/kg] – výhřevnost

$Q_s$  [kJ/kg] – spalné teplo

$W^r$  [–] – obsah vody v palivu

$r$  [kJ/kg] – výparné teplo vody ( $r=2454$  kJ/kg)

$H_2$  [–] – obsah vodíku v palivu

Hodnota výhřevnosti nejvíce ovlivňuje obsah aktivních prvků hořlaviny (C, H, S). Čím větší část paliva budou tyto prvky tvořit, tím bude výhřevnost větší. Při nárůstu obsahu popeloviny a vody procentuální množství těchto prvků klesá, a tak dochází ke snižování výhřevnosti.

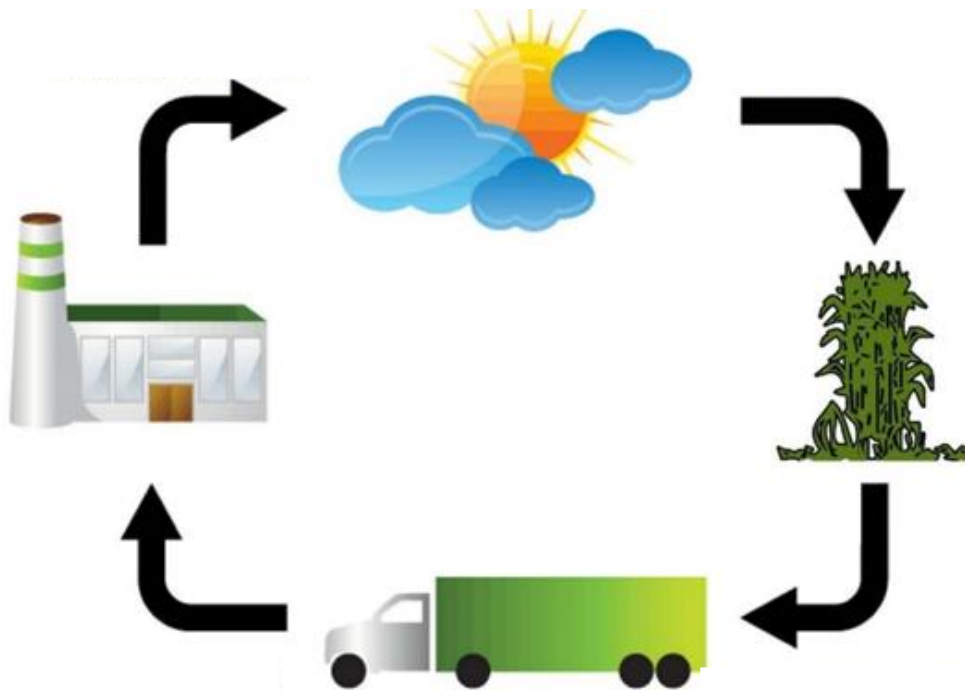
Výhřevnost je v praxi užitečnější charakteristika paliva než spalné teplo a častěji s ní počítáme. Z důvodu možné koroze je ve většině kotlů udržována teplota nad rosným bodem a voda je v nich tedy v plynné fázi.

---

<sup>5</sup> Kalorimetr – zařízení, na kterém lze experimentálně provádět tepelnou výměnu mezi tělesy a měřit teplotní veličiny: teplotu a teplo

### 3 Biomasa

Biomasa je veškerá organická hmota a je řazena na rozdíl od jiných tuhých paliv mezi obnovitelné zdroje energie. Při kvalitním spálení biomasy se do ovzduší uvolní zhruba tolik oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), kolik bylo v rostlině akumulováno fotosyntézou během jejího růstu (viz Obr. 2).



Obr. 2 – Neutrální cyklus oxidu uhličitého v biomase [8]

#### 3.1 Dělení biomasy

##### 3.1.1 Dělení dle původu

- rostlinného původu – dřeviny (dendromasa)  
– stébelniny (fytomasa)
- živočišného původu

##### 3.1.2 Dělení dle způsobu získávání

- Záměrně pěstovaná biomasa – energetické (rychle rostoucí) dřeviny (topoly, olše) a rostliny bylinného charakteru (např. šťovík), travní porosty, obiloviny, olejnaté a škrobo-cukernaté rostliny
- Odpadní biomasa – odpady z rostlinné výroby (odpady ze zemědělské prvovýroby), odpady z živočišné výroby (zvířecí exkrementy, hnůj), odpady z lesní těžby (kůra, dřevní hmota) a dřezpracujícího průmyslu (piliny), odpady z potravinářství a komunální odpad

#### 3.2 Charakteristické vlastnosti biomasy

Biomasa je oproti jiným tuhým palivům velice specifická ať už složením, tak také svým stářím. Proto ji v mnohém nelze k fosilním palivům zdaleka přirovnávat. I charakteristické

teploty u biomasy jsou nižší než u fosilních paliv, kde například u stébelnin teplota měknutí popela začíná již na 700 °C [1].

### 3.2.1 Vlhkost

Vlhkost je obzvláště u biomasy důležitým parametrem, a to především proto, že její obsah velice kolísá jak časově, tak co do druhů biomasy. Proto je nutné charakteristické vlastnosti jako jsou chemické složení nebo výhřevnost vztahovat na vlhkost paliva. Palivo z dřevozpracujícího průmyslu zpravidla obsahuje více vody než palivo získané ze zemědělské činnosti.

### 3.2.2 Popelovina

Obsah popeloviny je v biomase o poznání nižší než u fosilních paliv. Konkrétně u dřeva se jedná o 0,5 až 1 %. U stébelnin je tento rozptyl větší a tato hodnota může vyrůst až na 8 %. Obsahuje velké množství minerálních látek, které se dají využít např. jako hnojivo. Velkou roli u biomasy může hrát i popelovina přimísená, která se k palivu dostane zpravidla při transportu a skladování. Obsah popeloviny se tímto může zvýšit řádově o 5–10 % [1].

### 3.2.3 Hořlavina

Největším rozdílem biomasy oproti fosilním palivům je nízký obsah uhlíku v hořlavině. To vysvětluje, proč má hořlavina biomasy obecně nižší výhřevnost než například hořlavina uhlí. Podíl síry v biomase je oproti fosilním palivům relativně nízký (do cca 0,3 %). Zhruba polovina obsahu síry v biomase je tvořena sírou síranovou, která je nespalitelná [20]. Biomasa zpravidla obsahuje vysoký podíl prchavé hořlaviny<sup>6</sup> (75 až 85 %) [1].

### 3.2.4 Výhřevnost

Výhřevnost biopaliv je obecně mnohem nižší, než je tomu u paliv fosilních, a to zejména z důvodu menšího obsahu uhlíku a většího obsahu kyslíku v palivu. Výhřevnost se liší podle druhu biomasy a množství vlhkosti v palivu. Hodnota výhřevnosti hořlaviny naprosto suchého dřeva se pohybuje kolem 17 MJ/kg a u fytomasy se tyto hodnoty příliš neliší [6]. Při spalování se voda odpařuje a snižuje tak výhřevnost paliva. Pokud je navíc teplota za kotlem (popř. za výměníkem) vyšší než 101 °C, teplo obsažené ve vodní páře zůstane nevyužité. Palivo obsahující pryskyřice a oleje má výhřevnost o něco vyšší [1].

Pro výpočet skutečné výhřevnosti biopaliva použijeme vzorec: [2]

$$H_u = \frac{H_{uWf} \cdot (100 - w) \cdot (r \cdot w)}{100} \text{ [MJ/kg]} \quad (8)$$

$H_u$  [MJ/kg] – skutečná výhřevnost paliva

$H_{uWf}$  [MJ/kg] – výhřevnost sušiny

$w$  [%] – obsah vody v palivu

$R$  [MJ] – teplo potřebné k odpaření 1kg vody (=2,44MJ)

## 3.3 Spalování biomasy

Biomasa se nejčastěji používá ve formě kusového dřeva, dále pak ve formách ovlivněných zpracováním nebo upravených ke spalování (brikety, pelety, štěrky atd.)

<sup>6</sup> Prchavá hořlavina „je v normě definována jako podíl hořlaviny paliva, které se uvolní při zahřátí vzorku paliva bez přístupu vzduchu na teplotu 850 °C.“ [20]

Brikety jsou nejčastěji válcové nebo hranaté výlisky o vysoké hustotě vyráběné hlavně z vedlejších produktů dřevozpracujícího průmyslu jako jsou piliny, hobliny nebo kůra. Výhodou je především nízký obsah popelovin. Pelety jsou nejčastěji granule kruhového průřezu vyráběné za vysokého tlaku. Je u nich dosaženo vysoké hustoty paliva o vysoké výhřevnosti. Materiálem pro jejich výrobu jsou především dřevní a rostlinný odpad. Oproti těmto palivům jsou štěpky dřevní části, popř. dřevní odpad cíleně drcený za účelem lepšího skladování a efektivnějšího sušení [3] [4].

U biomasy je specifický především vysoký podíl prchavé hořlaviny, která se v první fázi spalovacího procesu uvolňuje pyrolýzou<sup>7</sup>. Prchavá hořlavina poté hoří až nad vrstvou paliva tzv. dlouhým plamenem. Z toho důvodu je potřeba do topeniště zajistit kromě přívodu primárního vzduchu (pod rošt) ještě větší množství vzduchu sekundárního (nad vrstvu paliva), díky kterému nebude docházet k emisím škodlivin vlivem nedokonalého spalování a tepelným ztrátám vlivem chemické nedokonalosti procesu. Závěrečnou fází je dohoření uhlíku v tuhém zbytku dřeva. Jedná se tedy o spalování dvoustupňové.

Z hlediska teplot měknutí popele i dávkování do kotle je spalování fytohmoty složitější než spalování dendromasy.

### 3.3.1 Emise při spalování biomasy

Tvorba škodlivin při spalování pevných biopaliv je primárně závislá na chemickém složení. Druhotně pak závisí na několika faktorech spojených s použitou technologií spalování a dávkování do kotle, popřípadě údržbou spalinových cest. Toho si lze všimnout na emisích TZL, kdy u špatně udržovaného zařízení mohou prachové částice z nedokonalého spalování tvořit až 90 % emisí. Při správných postupech jsou mnohonásobně nižší a převažuje prach z popelovin. Mezi škodlivé produkty spalování biomasy patří látky jedovaté (CO), karcinogenní (SO<sub>2</sub>) a plyny podporující skleníkový efekt (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O atd.). Množství SO<sub>2</sub> vzniklé spalováním biomasy je však natolik marginální, že nepatří mezi hlídané látky. Nejsledovanějšími tak zůstávají CO a prachové částice, které jsou schopny prozradit mnoho o kvalitě spalovacího procesu.

Škodliviny vzniklé spalováním biomasy se dělí na:

- škodliviny z neúplného spalování: oxid uhelnatý (CO), dehet, saze, vodík, nespálené uhlovodíkové částice a neúplně okysličené sloučeniny dusíku (N<sub>2</sub>O)
- škodliviny a produkty z úplného spalování: oxidy dusíku NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub>
- škodliviny z nečistot biopaliv: nespálitelné prachové částice, síra, sloučeniny chlóru a kovy

Koncentrace oxidů uhlíku ve spalinách v mnohém poukazuje na kvalitu spalovacího procesu a nastavených spalovacích parametrů. Stěžejní je především přívod dostatečného množství (nízký přebytek) ohřátého sekundárního (popř. terciálního) vzduchu do vzhosy mezi roštem a komínem. Dlouhý plamen, tvořený oxidujícím CO, při ochlazení vylučuje uhlík ve formě sazí, čímž dochází k velkým tepelným ztrátám. Při nedostatku vzduchu v topeništi pak uniká nespálený jedovatý oxid uhličitý do ovzduší. Při velkém přebytku vzduchu naopak dojde ke snížení koncentrace oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) ve spalinách, ale hrozí mnoho jiných komplikací. Snižuje se účinnost kotle důsledkem ohřátí velkého množství vzduchu způsobujícího ztrátu tepla komínovou ztrátou. V neposlední řadě také ochlazení plamene vedoucímu k nedokonalosti spalování [24].

<sup>7</sup> „Pyrolýza je tepelný rozklad paliva bez přístupu oxidačního media (kyslíku, vzduchu)“ [21]. Z tuhého paliva (dřevo) tak lze získat palivo plyné.

Podstatné znečištění ovzduší představují emise sloučenin  $\text{NO}_x$ , které vznikají při spalování dusíku obsaženého v palivu. Obecně se obsah palivového dusíku v biomase uvádí mezi 0,5 a 2 %. Reakční oxid  $\text{NO}$  vzniká při teplotách nad  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  a povětšinou reaguje s kyslíkem na  $\text{NO}_2$ . Ten zapříčiňuje tvorbu tzv. fotochemického smogu a částečně se podílí na vzniku kyselých dešťů [24].

Mezi další, již však opomíjené, produkty spalování biomasy patří organické sloučeniny, označované jako persistentní organické polutanty (POPs). Tyto látky vznikají při spalování chlóru, který se může do paliva dostat kromě přirozené cesty i díky hnojivům a ochranným chemickým prostředkům (postřikům). Jedná se hlavně o polychlorované aromatické uhlovodíky – PAU (PAH) a polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany (PCDD a PCDF). PAU jsou schopny přetrvávat v prostředí bez degradace, což může být ve spojení s karcinogeností a mutageností velice nebezpečné. Dioxiny, jak jsou souhrnně označovány PCDD a PCDF, jsou rovněž persistentní a k jejich teplotní destrukci je nutná teplota  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Mimo topeniště mohou být rozkládány pouze za působení ultrafialového záření. V lidském těle se kumulují v tukových tkáních a tělo je samo nedokáže odbourat. Emise dioxinů jsou z důvodu většího obsahu chlóru a podílu poléťavého popela vyšší u stébelnin než u dřeva [24].



## 4 Vlhkost a její vliv na spalování biopaliv

Jako u všech tuhých paliv, je i v biomase voda nežádoucí složka. Závisí hlavně na druhu a stáří biomasy, na zpracování, popřípadě na délce a způsobu uskladnění. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících vlhkost dřeva je stavba a hustota dřevní hmoty. Z hlediska uložení vody ve dřevě se rozlišuje [1] [12]:

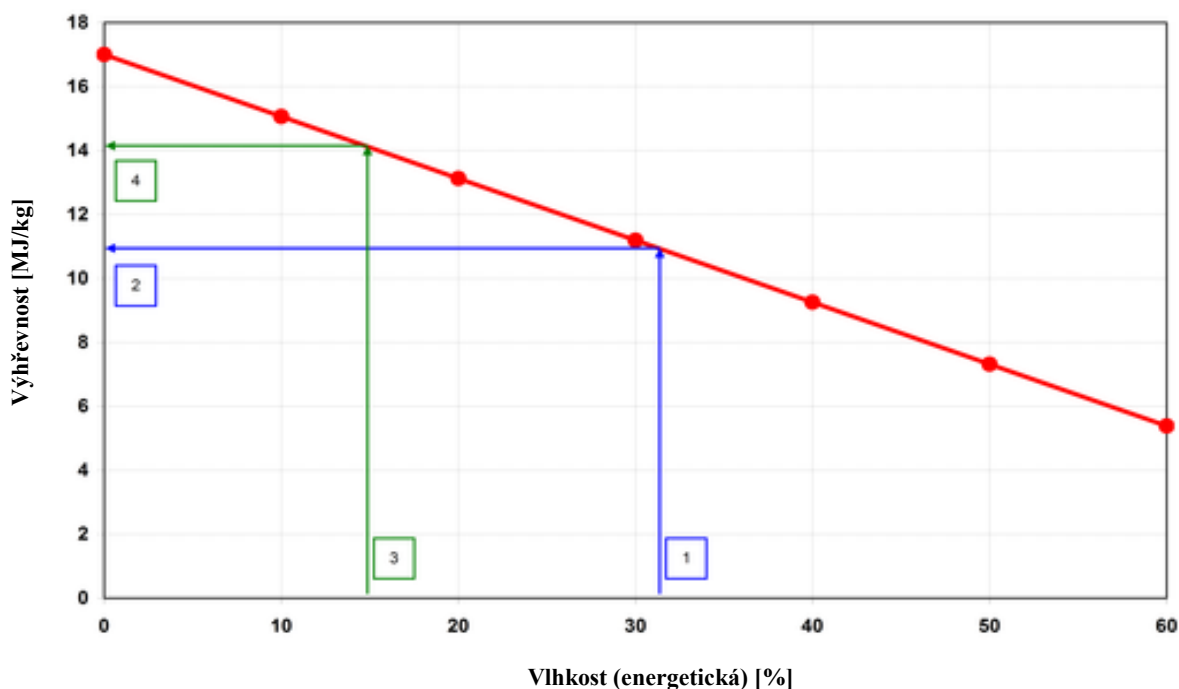
- voda volná – ve dřevě vyplňuje mezibuněčné prostory. Volná voda se vypařuje buď samovolně při sušení, nebo ji lze ze dřeva odstranit mechanicky (lisováním, odstředováním). Má mnohem menší vliv na charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností než voda vázaná. V některých zdrojích je voda takto obsažená v palivu označena jako voda hrubá a pod pojmem volná voda jsou myšleny společně voda hrubá, povrchová a přimísená.
- voda vázaná (hygroskopická) – se nachází v buněčných stěnách a z paliva se již vypařuje mnohem obtížněji. Vázanou vodu již nelze odstranit mechanicky. Zbavit se jí lze za pomoci tepla, a to přeměnou kapalné vlhkosti na vodní páru. Vázanou vodu je dřevo schopno znovu pohltit ve formě vodní páry, proto se rovněž nazývá voda hygroskopická. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší význam. Lze se setkat i s označením voda zbytková.
- voda chemicky vázaná – je ve dřevě součástí chemických sloučenin, a tudíž ji nelze odstranit sušením. Je v něm zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti a její množství představuje cca 1-2 % sušiny dřeva. Chemickou vodu lze odstranit pouze spalovacím procesem. Chemicky vázaná voda se dělí na hydrátovou (vázanou na popeloviny) a okludovanou (vázanou na hořlavinu). Nemá žádný vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti.

Hranici mezi volnou a vázanou vodou určuje mez nasycení buněčných stěn (MNBS) nebo mez hygroskopicity (MH). Jedná se o stav, kdy dřevo obsahuje maximální možné množství vody vázané a žádnou vodu volnou, přičemž u MNBS se jedná o vodu v kapalném skupenství a u MH o vodní páru. Při pokojové teplotě mají obě veličiny téměř shodně 30 % [9].

Dřevo má schopnost měnit svou vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí, přičemž se snaží vždy dosáhnout stavu vlhkostní rovnováhy mezi tlakem vodních par v okolí a ve dřevě. Schopnost dřeva pohlcovat ze vzduchu vodní páry se nazývá hygroskopicitá (navlhavost). O dřevu lze tedy říci, že je materiálem hygroskopickým. Schopnost dřeva absorbovat vodu v kapalném skupenství se označuje jako nasáklivost. Množství pohlcené vody závisí na době, po kterou bylo dřevo působení vody vystaveno. Rychlost pohlcování vody závisí na geometrii, počáteční vlhkosti dřeva a teplotě. Dřevo takto může bobtnat a sesychat pouze při rozdílu vlhkosti vzhledem k okolí a vždy v rozmezí od absolutně suchého dřeva do bodu nasycení vláken [9][12].

### 4.1 Vliv vlhkosti na výhřevnost

Jedna z charakteristik, která má s vlhkostí paliva téměř lineární závislost (viz Obr. 3), je výhřevnost. S rostoucí vlhkostí strmě klesá a snižuje tak efektivitu spalování a účinnost spalovacího zařízení. Celý proces spalování vlhkého dřeva je nevýhodný v tom, že voda obsažená v palivu se musí nejdříve ohřát a vypařit, na což je spotřebováno skupenské (výparné) teplo vody. Čím více vlhkosti dřevo obsahuje, tím více je výparného tepla spotřebováno. S větším obsahem vody ve spalinách se pak zvýší měrná tepelná kapacita spalin, které nestihnou teplo odevzdat a pokud není kotel uzpůsoben na kondenzaci vodní páry, dochází ke komínové ztrátě.



Obr. 3 – Závislost výhřevnosti dřeva na vlhkosti [20]

Na obr. 3 je přehledně vidět závislost výhřevnosti na vlhkosti dřeva. Výhřevnost sušiny u použitého vzorku činí cca 17 MJ/kg. Z grafu můžeme vyčíst, že u dřeva o vlhkosti asi 32 % (bod 1) činí hodnota výhřevnosti zhruba 10,7 MJ/kg (bod 2). Po jeho vysušení na vlhkost cca 15 % (bod 3) pozorujeme zvýšení výhřevnosti na 14 MJ/kg (bod 4). Rozdíl ve výhřevnosti se možná nezdá být tak markantní, ale například při vzrůstu vlhkosti z 15 % na 50 % bychom pro uvolnění stejného tepla potřebovali bezmála dvojnásobek dřeva, které by nebylo spáleno zdaleka tak kvalitně jako dřevo suché [20].

## 4.2 Vliv vlhkosti na emise

Vlhkost dřeva nejen snižuje efektivitu spalování, zkracuje dobu hoření, znesnadňuje vznícení a ochlazuje topeniště, ale ovlivňuje také ekologický dopad v podobě změny chemického složení palin. Ta je v důsledku zbarvení kouře viditelná pouhým okem.

Při nedodržení minimální teploty hoření (vlivem obsažené vlhkosti) pro dané zařízení dojde k tomu, že rovnice  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$  (9) přejde na tvar  $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$  (10) [1]. Vylučuje se tak nadměrné množství nespáleného uhlíku ve formě černých sazí, kde právě přítomnost uhlíku způsobuje obarvení kouře. Ze sloučenin se v nadměrném množství emituje jedovatý CO, který vlivem ochlazení plamene nedokázal reagovat s kyslíkem na  $\text{CO}_2$  a amoniak ( $\text{NH}_3$ ). Amoniak je sice bezbarvý, ale jeho přítomnost lze jednoduše odhalit pro jeho štiplavý zápach. I při spalování vlhkého dřeva závisí v nemalé míře na podmínkách spalování a konstrukci spalovacího zařízení. To je důvod, proč se u jednotlivých prodejců kotlů mohou lišit hodnoty maximální vlhkosti používaného paliva i za předpokladu splnění stejných emisních tříd.

U mokrého dřeva můžeme sledovat v nemalé míře zvýšení emisí TZL a PAH. Tuhé částice se emitují v menší míře i při spalování suchého dřeva, nicméně u nich existují odlišnosti ve velikosti, morfologii i vzhledu. Částice vznikající spalováním mokré biomasy dosahují relativně velkých rozměrů, větších než  $0,55 \mu\text{m}$ . TZL vzniklé spalováním dřeva

po vysušení se ve spalínách také vyskytují. Jsou však v menším množství a relativně malé (cca 0,34 – 0,45  $\mu\text{m}$ ) [13].

zkouška	palivo	emise:	CO [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]	OGC [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]	TZL [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]
1	suché smrkové dřevo		12 600	631	280
2	mokrý smrkové dřevo		15 500	3 260	663

*Tab. 2 – Měření emisí suchého a mokrého smrkového dřeva [5]*

V tab. 2 jsou k vidění výsledky experimentu prováděného na VŠB v Ostravě, kdy můžeme vidět nárůst CO a TZL u vlhkého dřeva v řádu desítek procent oproti dřevu suchému. Emise organického uhlíku (OGC) se však v porovnání se spalováním suchého dřeva zvýšily skoro pětinašobně.

Mokrý dřevo lze tedy označit za velice nekvalitní palivo. Obecně platí, že kvalitně spálené uhlí vyprodukuje méně emisí než nevhodně spálené dřevo s vysokým obsahem vlhkosti.



## 5 Stanovení vlhkosti dřeva

Existují dva základní způsoby pro vyjádření vlhkosti ve dřevě. Dřevařská vlhkost se určuje poměrem hmotnosti vody ve dřevě a hmotnosti vysušeného vzorku dřeva. Lze takto teoreticky dosáhnout vlhkosti přes 100 % [22].

$$w_d = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 [\%] \quad (11)$$

$w_d$  [%] – dřevařská vlhkost

$m_1$  [kg] – hmotnost vlhkého vzorku

$m_2$  [kg] – hmotnost suchého vzorku

Ve vyjádření energetické vlhkosti se naopak hmotnost vody ve dřevě vztahuje k původnímu vzorku. Energetická vlhkost je mnohem směrodatnější, hovoříme-li o energetickém využití, jakým spalování biomasy je. Dřevařská vlhkost se proto v energetice téměř nepoužívá [22].

$$w_e = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (12)$$

$w_e$  [%] – energetická vlhkost

$m_1$  [kg] – hmotnost vlhkého vzorku

$m_2$  [kg] – hmotnost suchého vzorku

Vlhkost biomasy je kolísavá a závisí na prostředí, ve kterém je palivo umístěno. Obsah vody se u palivového dřeva pohybuje v rozmezí od méně než 20 % u sušeného až do 65 % u surového dřeva. U stébelnin lze mluvit o ještě větším podílu vody, nicméně ty jsou energeticky využitelné pouze usušené [12].

### 5.1 Přímé (absolutní) metody měření vlhkosti

Přímými metodami se zjišťuje skutečný obsah vody ve dřevě, a to oddělením vody od pevné fáze. Nejčastěji se tak vlhkost určuje pomocí váhové (gravimetrické), popřípadě destilační zkoušky.

Gravimetrická metoda vychází z definičního vzorce podle rovnice (12) a lze ji nazvat jako procentuální podíl vody ve vzorku. Metoda je velice přesná a působí jako referenční metoda pro posuzování správnosti ostatních metod. Váhová metoda probíhá za jasně stanovených podmínek podle normy ČSN 49 0103. Normovaná zkušební tělesa ve tvaru pravoúhlého hranolu jsou vysušena při teplotě  $103 \pm 2$  °C do ustálené hmotnosti. Za vysušené se dřevo považuje až tehdy, kdy se v intervalu 2 hodin nezmění hmotnost vzorku o více než 0,02 g, popř. 1 %. Poté je hmotnost vzorku porovnána s počáteční hmotností podle vzorce [9].

Destilační (extrakční) metoda se užívá například u silně pryskyřičného dřeva. Je však zdlouhavá a nákladná.

## 5.2 Nepřímé (relativní) metody měření vlhkosti

Některé existující metody pracují na principech, kdy obsah vody určují nepřímo, tedy prostřednictvím veličin, které jsou přímo závislé na podílu vody ve dřevě. Jsou to například metody elektro-fyzikální (odporová, kapacitní), radiometrické (založené na absorpci záření), akustické (využívající rychlost šíření a absorpci zvuku) nebo termo-fyzikální, které jsou založeny na změně teplotních vlastností dřeva (změně součinitele teplotní vodivosti).

Z přístrojů, pracujících na nepřímých metodách, jsou nejužívanější elektrické vlhkoměry. Ty jsou vysoce spolehlivé především při měření vlhkosti dřeva s malým obsahem vody. S nárůstem vody ve dřevě přesnost klesá.

## 6 Sušení dřeva

Sušení je fyzikální proces odstraňování nežádoucí vody z paliva. Při sušení dochází k procesům přenosu tepla nutného k odpaření vody, a to výhradně konvekcí ze sušícího média (vzduchu) do sušeného materiálu (dřeva). Sušení probíhá kontinuálně, ale nerovnoměrně v celém objemu paliva. Napříč dřevem, od povrchových k vnitřním vrstvám, vzniká gradient teploty a vlhkosti.

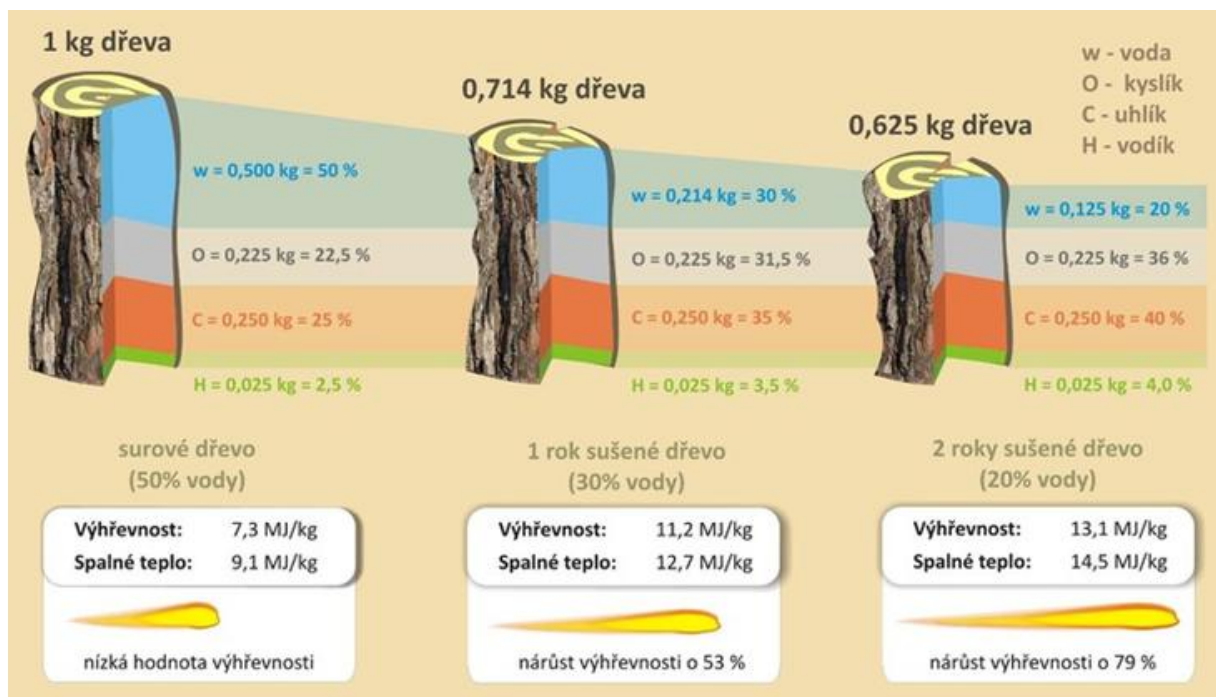
Při sušení dochází k sesychání. Při procesu sesychání se zmenšují lineární rozměry, plocha nebo objem tělesa při současné ztrátě vázané vody. Sesychání je dáno součtem jednotlivých lineárních sesychání v podélném, radiálním a tangenciálním směru a je přímo úměrné hustotě dřeva. Opakem je bobtnání [10].

Na základě koeficientu sesychání ( $K\beta V$ ) lze dělit jednotlivé druhy dřeva do třech základních skupin [10]:

- dřeva málo sesychavá –  $K\beta V < 0,4$  (olše, topol, tis)
- dřeva středně sesychavá –  $K\beta V = 0,4 \div 0,47$  (smrk, borovice, dub)
- dřeva hodně sesychavá –  $K\beta V > 0,47$  (bříza, lípa, modřín)

Z hlediska způsobu se sušení dělí na:

- Pasivní (přirozené) sušení – sušení dřeva na vzduchu pod přístřeškem nebo pokrývkou s minimální propustností. Náklady na pasivní způsob sušení dřeva jsou minimální. Nevýhodou je ale malá rychlost, což má obvykle za následek potřebu velkých skladovacích prostor.
- Aktivní (umělé) sušení – aktivní sušení se provádí za pomoci sušáren několika typů. Jednotlivé druhy se liší zpravidla způsobem, jakým se dodává energie použitá k sušení, a způsobem dopravování paliva.



Obr. 4 – Snížení obsahu vody za současného zvýšení výhřevnosti dřeva během 2 let sušení [6]

Dřevo sušíme především kvůli lepší výhřevnosti a dokonalejšímu spálení. Za suché považujeme dřevo s obsahem vody menším než 20 % [7].

Vlastnosti dřeva před a po uskladnění jsou výstižně shrnuty na obr. 4. Po 2 letech, kdy byl 1 kg surového dřeva uskladněn, ubyla hmotnost polena o vypařenou vodu. Koncentrace aktivní hořlaviny se tak zvýšila z původních 27,5 % na konečných 44 % a výhřevnost z počáteční hodnoty 7,3 MJ/kg na 13,1 MJ/kg.

## **6.1 Skladování dřeva**

Aby bylo dřevo dostatečně suché a vhodné pro efektivní spálení, doporučuje se jej uskladnit pod přístřešek minimálně po dobu dvou let [6]. Vhodné pro uskladnění je dobře větrané místo s co nejnižší vlhkostí vzduchu. V nevětraném vlhkém prostoru může dřevo hnit a plesnivět, a tím ztrácet svou energetickou hodnotu. Při příliš dlouhém uskladnění se zvyšuje pravděpodobnost napadení dřeva různými škůdci a mikroorganismy, které rovněž degradují jeho vlastnosti. Proto se jeví 2 roky jako ideální doba pro uskladnění.



## 7 Zařízení pro spalování biomasy

Pro specifické vlastnosti lze biomasu spalovat jen v topeništích určených pro tento druh paliva. Spalování biomasy v nevhodných topeništích sice je technicky možné, ale je spojeno s nízkou účinností zařízení a nežádoucími emisemi. To platí i co se jednotlivých druhů biomasy týče.

Topeniště dělíme podle způsobu užití na dva základní druhy: lokální a centrální.

### 7.1 Lokální vytápění dřevem

Pro lokální topeniště obvykle postačují kotle o malém instalovaném výkonu do 65 kW [20]. Používají se zpravidla pro vytápění menších prostor, bytových jednotek nebo rodinných domů. Kusové dřevo je v lokálních topeništích nejčastějším palivem. Spaluje se za těchto čtyřech fází:

- Sušení (odpařování vlhkosti z paliva)
- Pyrolýza (uvolnění prchavé hořlaviny)
- Spalování plyné složky paliva
- Spalování pevných hořlavých látek

Při rovnoměrném dodávání paliva o stejné vlhkosti a konstantním přívodu vzduchu probíhají tyto pochody současně.

Konstrukce kotle na dřevo musí být upravena tak, aby menší část kyslíku byla přiváděna pod rošt (primární vzduch) pro oxidaci tuhých zbytků. Větší část ohřátého vzduchu je potom přiváděna nad roštem (sekundární vzduch). Nad roštem zároveň nesmí být teplosměnné plochy a výměníky, nýbrž prostor s vhodnou vyzdívkou udržující žár.

### 7.2 Druhy kotlů

Podle přísunu vzduchu se zařízení dělí na [23]:

- Kotle s přirozeným přísunem vzduchu – jsou závislé pouze na tahu komína
- Kotle s nuceným přísunem vzduchu – podtlak v ohništi je vytvářen a regulován ventilátorem

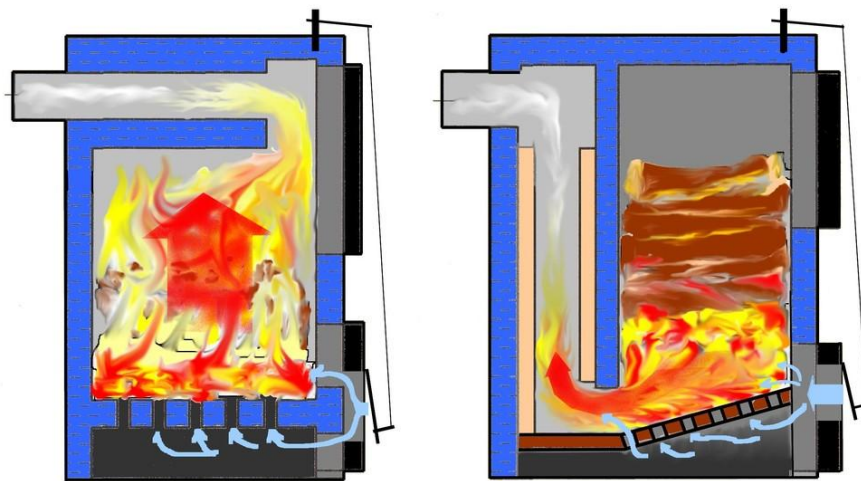
Podle způsobu dávkování paliva dělíme kotle podle normy ČSN EN 303-5 na [23]:

- Kotle s ruční dodávkou paliva – palivo je dodáváno ručně v intervalech závislých na rychlosti hoření
- Kotle se samočinnou dodávkou paliva – palivo je dodáváno automaticky podle nastavení v závislosti na tepelného výkonu

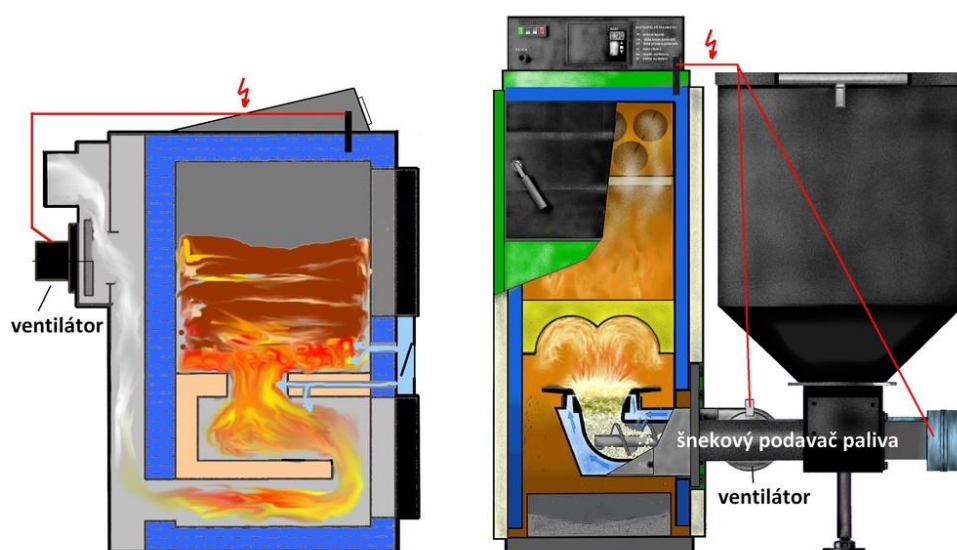
Podle technologie spalování se kotle dělí na [23]:

- Prohořivací – v kotli probíhá postupné spalování, přičemž spaliny prochází přes vrstvu paliva. Jedná se o kotle s ručním přikládáním. Z důvodu nekontrolovatelného uvolňování prchavé hořlaviny je u tohoto typu kotlů značně omezená regulace výkonu. Typickým zástupcem jsou litinové kotle, které při spalování dřeva dosahují pouze 2. emisní třídy, a proto pro tento druh paliva již od roku 2013 nejsou v prodeji a po roce 2022 nebude povolen jejich provoz.

- Odhořivací – kotel funguje na principu postupného spalování paliva ve spodní části násypky. Palivo je ve vrstvě plynule doplňované a lze tedy z části hovořit o regulaci. Spaliny neprocházejí přes vrstvu paliva jako u kotle prohořivacího. Odhořivací kotle mohou po úpravách dosáhnout 3. emisní třídy a tak bude povolen jejich provoz i po roce 2022. V roce 2017 se však přestanou prodávat.
- Zplyňovací – je to druh odhořivacího kotle s ručním přikládáním, u kterého je regulován přívod vzduchu ventilátorem. Spalování je tak mnohem kvalitnější a je spolu s výkonem snáz regulováno. Uvolňování a spalování prchavé hořlaviny je tak plně pod kontrolou. Zplyňovací kotle bez problému dosahují emisní třídy 3, a proto nebude v nejbližších letech jejich prodej a provoz omezen.
- Automatický – kotel se samočinným dávkováním paliva a ventilátorem s kontrolovaným přívodem vzduchu. Jedná se o nejmodernější typ kotlů. U automatických kotlů na pelety lze dosáhnout nejvyšší 5. emisní třídy.



Obr. 5 – Princip spalování v prohořivacím (vlevo) a odhořivacím kotli (vpravo) [23]



Obr. 6 – Princip spalování ve zplyňovacím (vlevo) a automatickém kotli (vpravo) [23]

### 7.3 Vliv vlhkosti na provoz kotle

Kotle na dřevo jsou konstrukcí i použitým materiálem určeny rozmezím spalovacích teplot, a tedy i rozmezím vlhkosti paliva. Vlhkost paliva tyto teploty přímo ovlivňuje a při překročení přípustné meze nastane to, že u kotle klesne výkon, přičemž nebude vykazovat deklarovanou účinnost a bude produkovat více emisí. Může se tak stát, že překročí emisní limity, které při koupi garantoval výrobce. Naopak při spalování příliš vysušeného paliva může dojít k překročení předepsaných teplot a k problémům s tím spojených. Při vysokých teplotách může docházet například k tavení nebo tečení popelovin a k likvidaci vyzdívky topeniště [1].

Palivo, při jehož spalování kotel dosahuje uváděný výkon, účinnost a životnost se nazývá zaručené palivo. Palivo, které lze v daném kotli také spalovat, ovšem bez dosažení tak vysokých tepelných hodnot, je palivo náhradní [15].

Pro dřevo je nejčastěji uváděna doporučená vlhkost kolem 20 %. Technicky se spalovat dřevo s vyšší vlhkostí dá, nicméně kotel ztratí na výkonu. Obecně platí, že čím výkonnější je kotel, tím snáze lze spalovat vlhčí palivo. Někteří výrobci uvádějí nejvyšší možnou vlhkost paliva až 40 %, ale jedná se většinou o štěpky, pelety, aj., nikoliv o kusové dřevo. Například výrobce kotlů Josef Novák – TRACTANT FABRI Kolín uvádí v propagačních materiálech kotle typu TFU a TFA (výkon až 4MW) na dřevní odpad do vlhkosti až 60 % [15].

### 7.4 Průzkum trhu s kotli na dřevo pro lokální vytápění

V tab. 3 jsou k vidění tři různé kotle značek SLOKOV, AM a ATMOS, volně prodejné na internetu. U všech je jako zaručené palivo uvedeno kusové dřevo s maximální vlhkostí 20 %. U kotle ATMOS DC25S je jako u jednoho z mála a jediného z těchto tří kotlů uvedena dolní hranice vlhkosti dřeva, při které může být dosaženo jmenovitého výkonu.

	SLOKOV VARIANT SL23D	AM 23 Energo	ATMOS DC25S
země původu:	ČR	ČR	ČR
typ:	odhořivací	zplyňovací	zplyňovací
jmenovitý výkon:	23 kW	23 kW	25 kW
účinnost:	84%	82–88 %	81–87 %
palivo:	kusové dřevo	kusové dřevo	kusové dřevo
max. vlhkost paliva:	do 20%	do 20%	12–20 %
emisní třída:	3	5	5
objem palivové šachty:	61 l	110 l	100 l
hmotnost:	260 kg	420 kg	326 kg
cena s DPH:	od 34 900, –	od 50 200, –	od 49 400, –

Tab. 3 – Parametry tří vybraných kotlů [16] [17] [18]

Kotel značky SLOKOV je jako jediný z výběru odhořivací, což můžeme poznat i na 3. emisní třídě, kterou splňuje. Tento kotel je nejlevnější, ale to nezmění fakt, že dle zákona o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. bude na konci roku 2017 stažen z prodeje. Oproti tomu kotle

AM 23 Energo a ATMOS DC25S splňují nejvyšší možnou emisní třídu 5 a v prodeji i v provozu mohou být nadále i po roce 2022 [23].

## 7.5 Průzkum trhu s krbovými vložkami

V Tab. 4 jsou srovnány krbové vložky tří typů dle základních technologických údajů a různé cenové kategorie. Doporučeným palivem je u všech tří zástupců dřevo. Všechny vybrané krbové vložky jsou volně dostupné ke koupi na internetu.

	UNIFLAM 600	ROMOTOP KV 6.6.2	STEKO VENUS 12.1
země původu:	Francie	ČR	ČR
materiál:	litina	litina - ocel	ocel
jmenovitý výkon:	8 kW	8 kW	8 kW
účinnost:	70%	78%	92%
palivo:	dřevo	dřevo	dřevo
max. vlhkost paliva:	–	–	do 20%
spotřeba paliva:	–	2,5 kg/h	2 kg/h
emise CO:	0,26%	–	0,10%
průměrná teplota spalin:	279 °C	284 °C	224 °C
tah komína:	12 - 14 Pa	12 Pa	12 Pa
hmotnost:	88 kg	135 kg	93 kg
cena bez DPH:	od 6750, –	od 21 000, –	od 20 900, –

Tab. 4 – Parametry tří vybraných krbových vložek [25] [31] [19]

Trh s krbovými vložkami je poměrně široký. Převažují v něm konstrukce z ocele, litiny, popř. z kombinací obou těchto materiálů. Ve velké míře převažují zařízení konstruované pro spalování dřeva. Na rozdíl od kotlů v tab. 3 byl u krbových vložek větší problém s dohledáváním informací. Především doporučenou vlhkost paliva, hodinovou spotřebu paliva a emise CO mnohdy nebylo možné najít ani v oficiálních katalozích výrobců. To je také důvod, proč je tab. 4 neúplná. Krbové vložky s dohledanými údaji o emisích normu s přehledem splňují, s tím že STEKO VENUS 12.1 splňuje dle informací z katalogu i přísné emisní limity v Německu a Rakousku. Jako nejkvalitnější se dle technologických údajů jeví krbová vložka STEKO VENUS 12.1. Tato krbová vložka bude dále použita v experimentální části pro spalovací zkoušky.

## 8 Experimentální část

Hlavním cílem experimentu bylo provést základní spalovací zkoušky na malém stacionárním zdroji znečištění ovzduší a experiment vyhodnotit. Hlavním výstupem experimentu je zjištění množství emisí znečišťujících látek, jejich porovnání s platnými emisními limity a zhodnocení vlivu vlhkosti na naměřená data.

### 8.1 Spalovací zkouška

Spalovací zkouška proběhla v laboratoři Energetického ústavu v prostorách Vysokého učení technického v Brně. Experiment proběhl pod odborným vedením pana Ing. Martina Lisého, Ph.D a Ing. Otakara Štelccla.

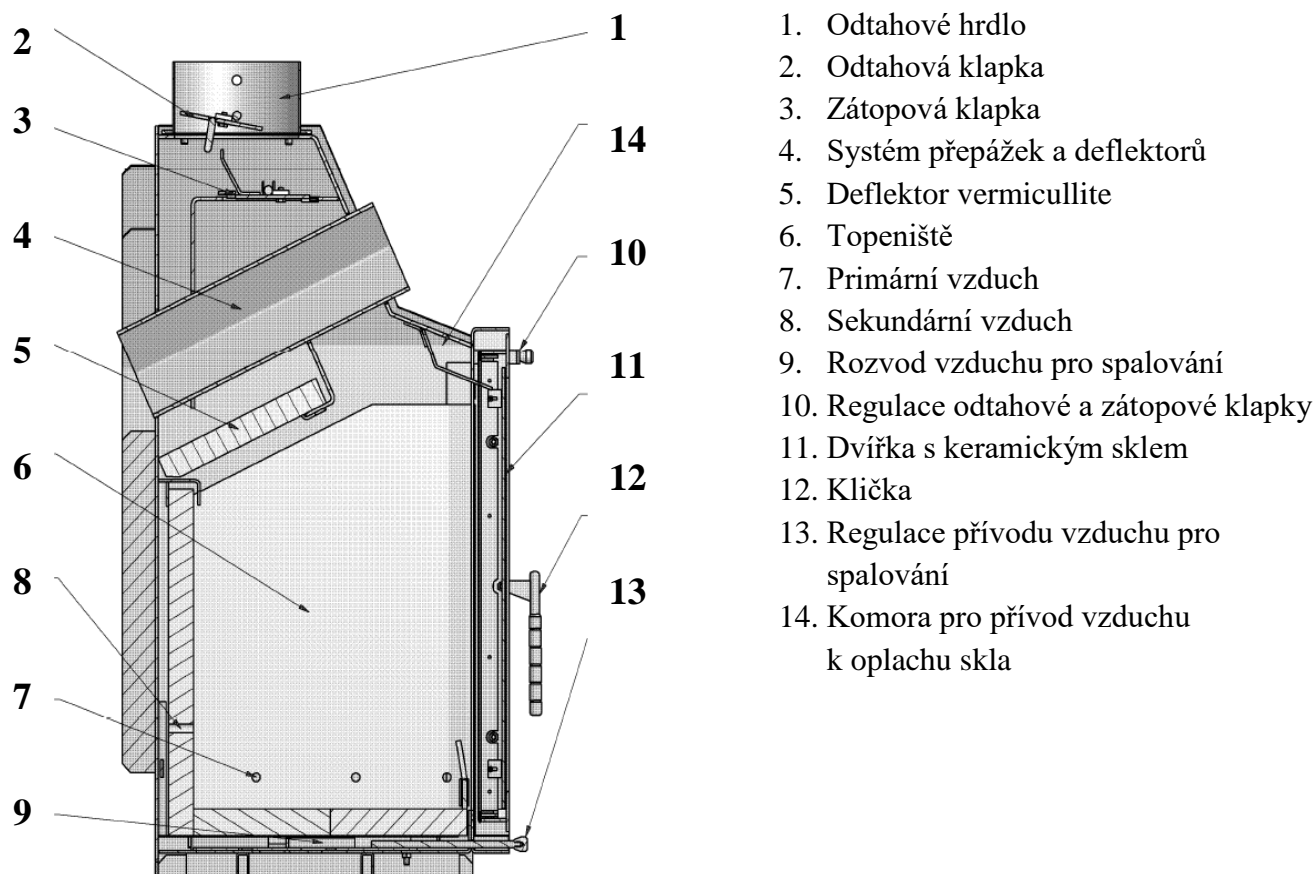
Zkouška proběhla na krbové vložce STEKO VENUS 12.1 podle platné normy ČSN EN 13229. Krbová vložka byla umístěna na digitální váze pro orientační sledování úbytku paliva. Spaliny byly odváděny komínem s ventilátorem. Sonda na měření spektra spalín a objemu kyslíku byla umístěna na boční straně kouřovodu cca 1 metr nad topeništěm. Aby měření vykazovalo co nejpřesnější hodnoty, zaizolovali jsme všechny spoje, kde hrozily netěsnosti ve spalínových cestách. Jako palivo jsme použili bukové kusové dřevo, které spadá mezi paliva předepsaná výrobcem.



*Obr. 7 – Krbová vložka STEKO VENUS 12.1 s kouřovodem se sondou pro měření spalín*

## 8.2 Použitá technika

**STEKO VENUS 12.1** je krbová vložka určená k lokálnímu vytápění rodinných domů, chalup apod. Je vyrobena z ocelového plechu síly 2-4 mm. Základní krbové těleso tvoří svařenec z tvarových plechů síly 3-4 mm. Ohniště, zadní a boční stěny jsou obloženy šamotovými tvarovkami. Čelní strana je opatřena prosklenými dvířky. Primární a sekundární vzduch se reguluje jedním táhlem (viz obr. 8) a jejich poměr je přesně nastaven výrobcem [36].



Obr. 8 – Schéma krbové vložky STEKO VENUS 12.1 s popisem jednotlivých součástí [36]

Výrobcem předepsané palivo je suché dřevo a dřevěné brikety. Krbovou vložku lze provozovat pouze se zavřenými dvířky. V opačném případě nelze zaručit odvod spalin a dosažení hodnot předepsaných výrobcem (viz tab. 5).

**ULTRAMAT SIEMENS 21/O2 A 22** je analyzátor spalin, který umožňuje měření vybraných sloučenin aktivních v infračerveném záření a určit tak chemické spektrum spalin. Měření probíhá metodou nedisperzní infračervené spektrometrie. V tomto experimentu byl využit pro měření koncentrace CO, NO, SO<sub>2</sub> a procentuálního množství O<sub>2</sub> ve spalinách.

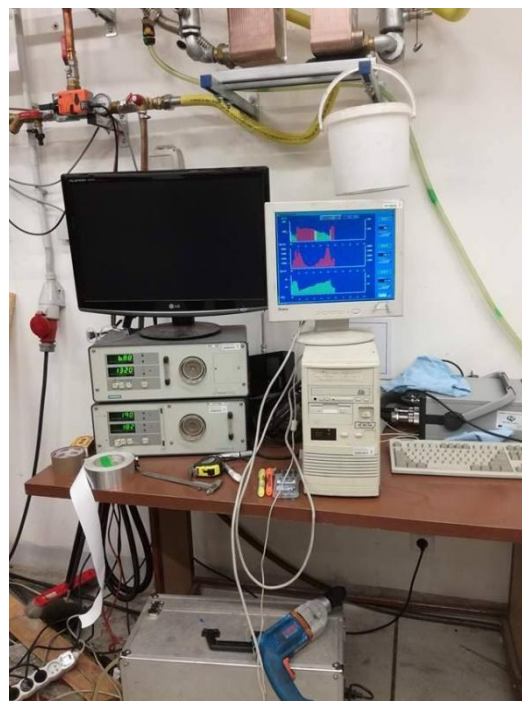
### **Technické parametry krbové vložky STEKO VENUS 12.1**

jmenovitý tepelný výkon:	8 kW
účinnost:	92%
palivo:	dřevo/dřevěné brikety
obsah vody v palivu:	do 20%
spotřeba paliva:	2 kg/h
obsah CO ( $O_{2,ref}=13\%$ ):	0,1% (1250 mg/m <sup>3</sup> )
rozměry:	911/492/467 mm
hmotnost:	93 kg
vytápěcí schopnost:	126 m <sup>3</sup>
minimální tah komína:	12 Pa
průměr kouřovodu:	150 mm

*Tab. 5 – Technické údaje krbové vložky STEKO VENUS 12.1 předepsané výrobcem [36]*



*Obr. 10 – Sondy pro analýzu spalín  
na boční straně kouřovodu*



*Obr. 9 – Analyzátor spalín  
ULTRAMAT SIEMENS 21/O2 A 22 s  
obrazovkou vykreslující měřené  
veličiny v průběhu procesu*



### 8.3 Průběh a výsledky měření

Postup měření byl normalizovaný, aby byly výsledky měření relevantní a porovnatelné s platnými normami a legislativou.

Jako palivo bylo zvoleno bukové dřevo, z kterého byly připraveny tři vzorky lišící se obsahem vody. Za vzorek č. 1 jsme považovali dostatečně vysušené dřevo. Vzorky č. 2 a 3 byly shodně namáčeny ve vodě po dobu několika hodin s tím rozdílem, že polena 2. vzorku schly po namáčení několik dní na vzduchu. Polena označena za vzorek č. 3 byla po namáčení uzavřena v igelitovém pytli bez přívodu vzduchu. Gravimetrickou metodou byly určeny vlhkosti u jednotlivých vzorků, a to 7,1 %, 10,9 % a 17 %.

Před zahájením spalovací zkoušky byla krbová vložka roztopena, aby se její výkon přiblížil co možná nejvíce tomu jmenovitému. Pro každý vzorek byly provedeny 2 spalovací zkoušky. Každá trvala 45 minut (48 minut u 3. vzorku), což je dle normy ČSN EN 13229 nejkratší interval dodávky paliva při jmenovitém výkonu pro spotřebiče s krátkodobým spalovacím procesem [37]. Zkouška započala vždy vložením dvou přibližně stejně velkých polen o celkové hmotnosti 1,7 kg (s minimální odchylkou) do topeniště a uzavřením dvířek. Jednotlivé spalovací zkoušky na sebe plynule navazovaly. Měření bylo uskutečněno za neměnných okolních podmínek (viz tab. 6). Při zkoušce došlo chybou techniky ke ztrátě dat, konkrétně teplot spalín v průběhu měření. Absence těchto důležitých hodnot sice znesnadnila vyhodnocení experimentu, nicméně i bez nich bylo dosaženo požadovaných výsledků.

Podmínky během měření		
Teplota okolí	Atmosférický tlak	Relativní vlhkost vzduchu
20,1 °C	995 kPa	17,5%

Tab. 6 – Okolní podmínky v průběhu měření

Kontinuálně s probíhající zkouškou bylo analyzátozem spalín zaznamenáváno množství CO, NO, SO<sub>2</sub> a objem O<sub>2</sub> ve spalínách. Pro další analýzu spalovacího procesu jsme již neuvažovali SO<sub>2</sub> z důvodu výskytu stopového množství síry v biomase. Naměřená data byla vyexportována do prostředí EXCEL, kde byla dále zpracovávána a použita pro tvorbu srovnávacích grafů. V průběhu spalování kolísala hladina kyslíku, a tak bylo nutné naměřené hodnoty CO a NO přepočítat na referenční hodnoty CO<sub>ref</sub> a NO<sub>ref</sub> podle referenční hodnoty kyslíku O<sub>2,ref</sub> = 13 % (pro krbové vložky). Pro přepočet se používá vzorec:

$$X_{ref} = X \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_2} \quad (13)$$

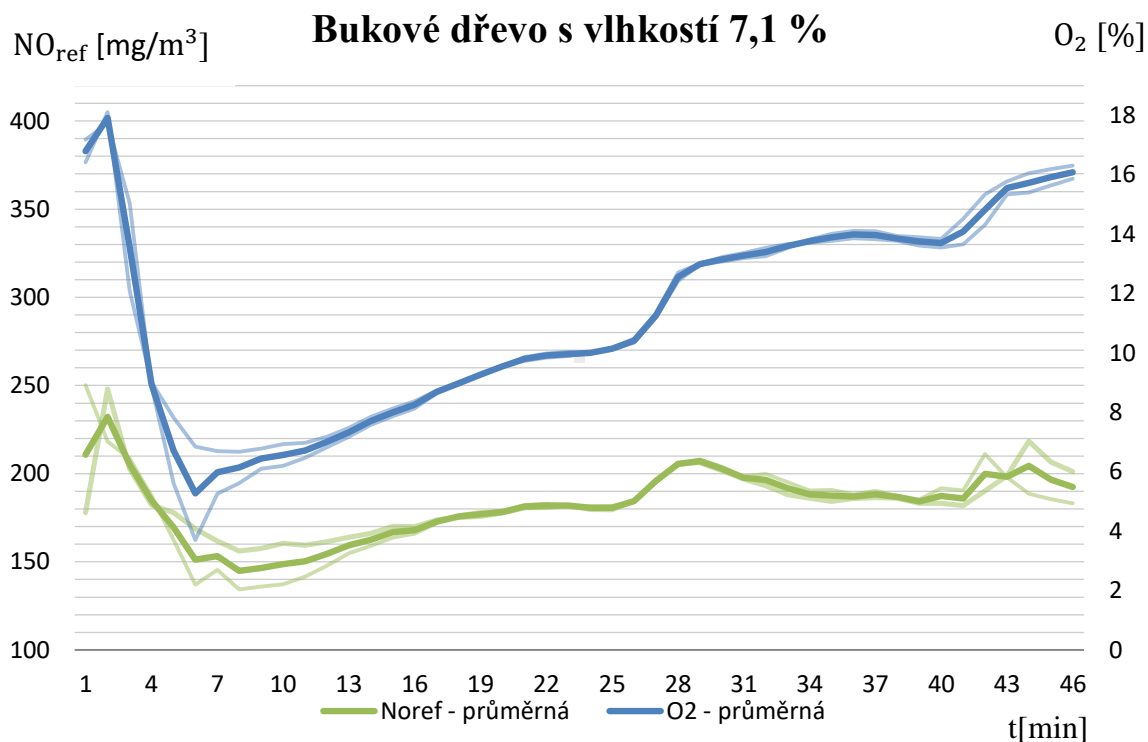
X<sub>ref</sub> [mg/m<sup>3</sup>] – referenční hodnota plynu

X [mg/m<sup>3</sup>] – aktuální hodnota plynu

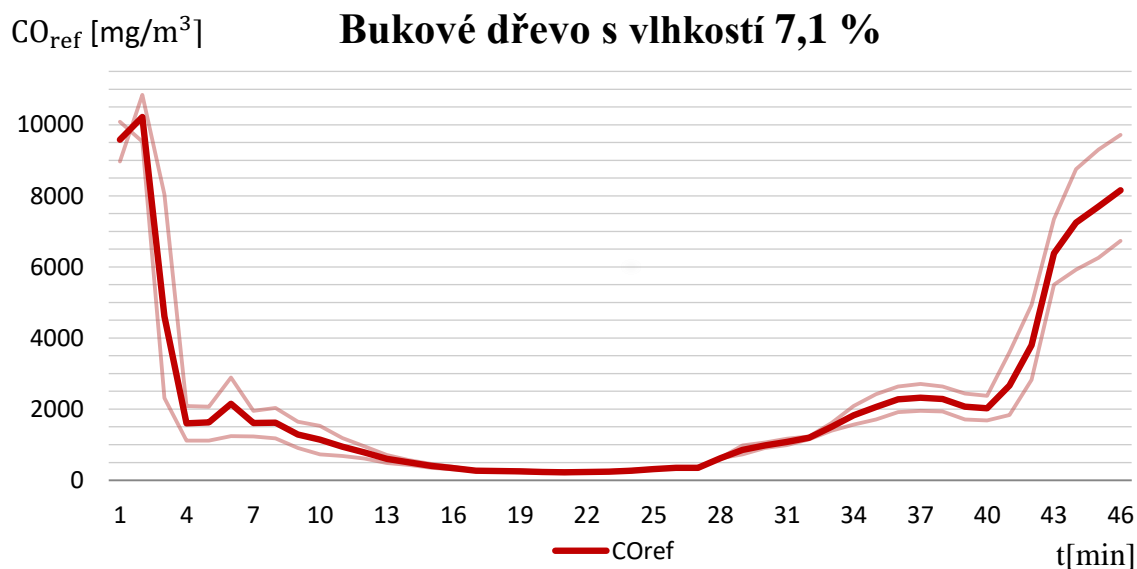
O<sub>2,ref</sub> [%] – referenční hodnota kyslíku (O<sub>2,ref</sub> = 13%)

O<sub>2</sub> [%] – aktuální hodnota kyslíku

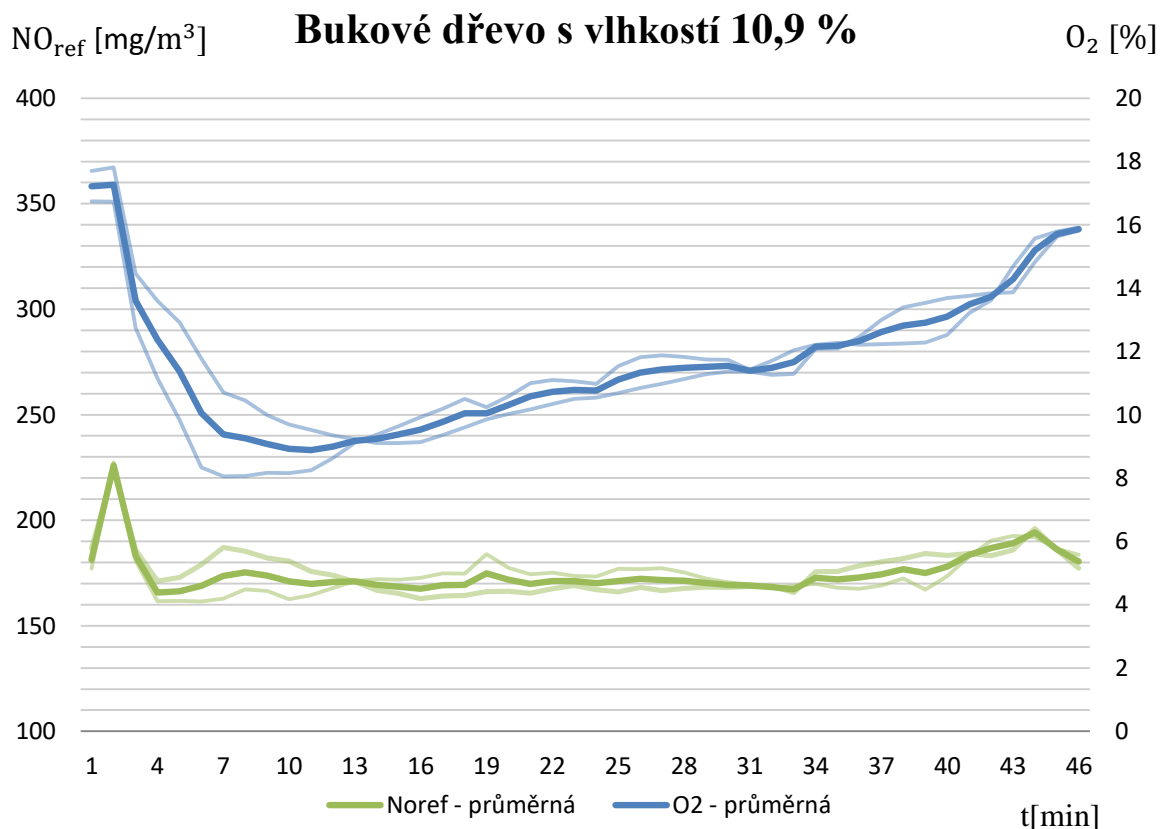




Obr. 11 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 7,1 %



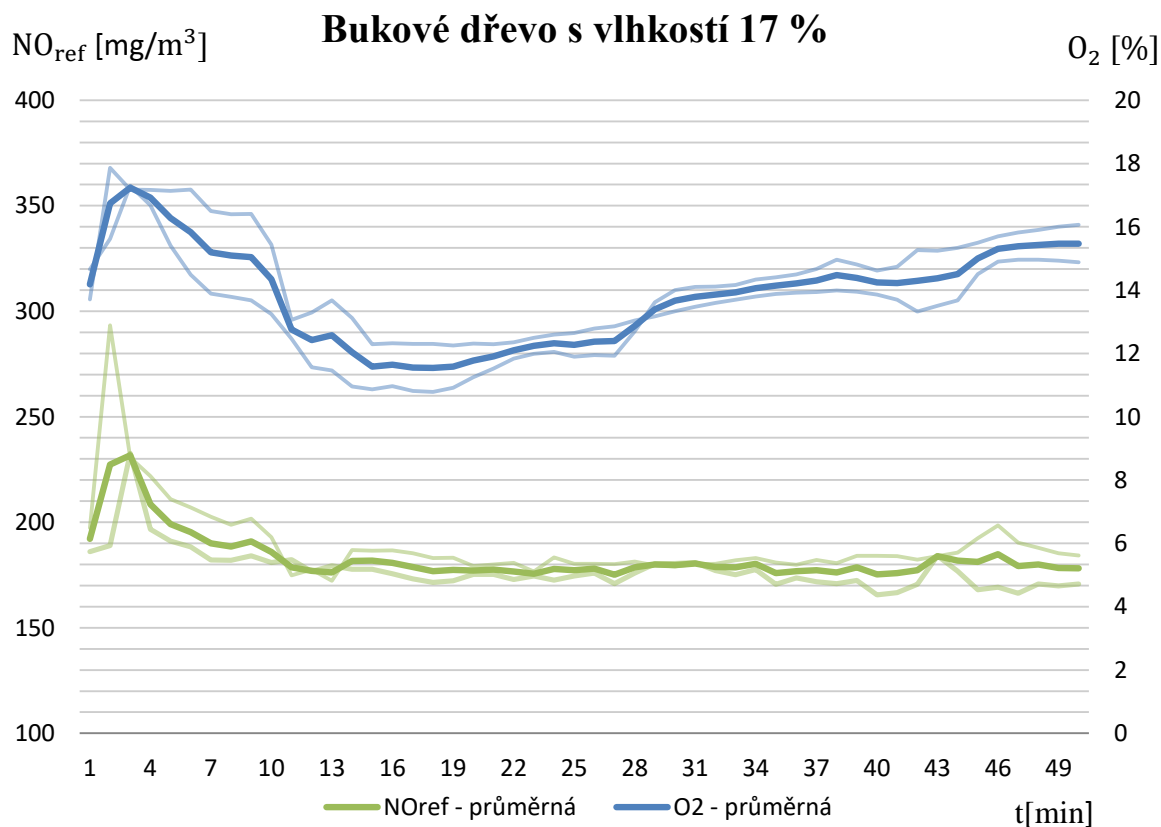
Obr. 12 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 7,1 %



Obr. 13 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 10,9 %



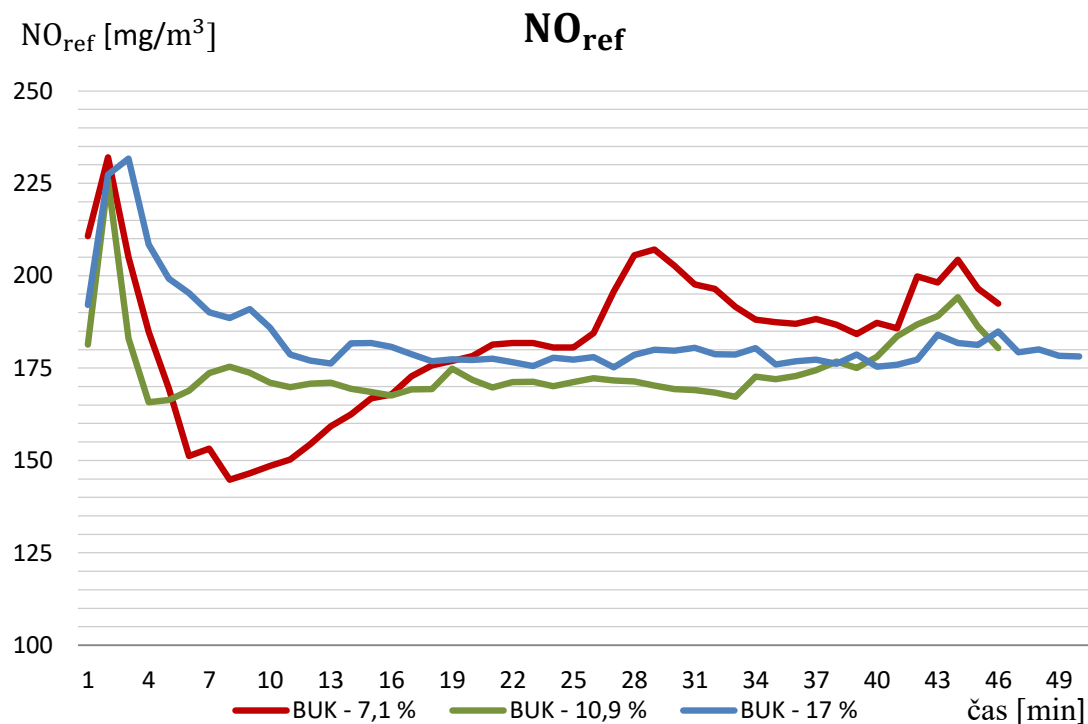
Obr. 14 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 10,9 %



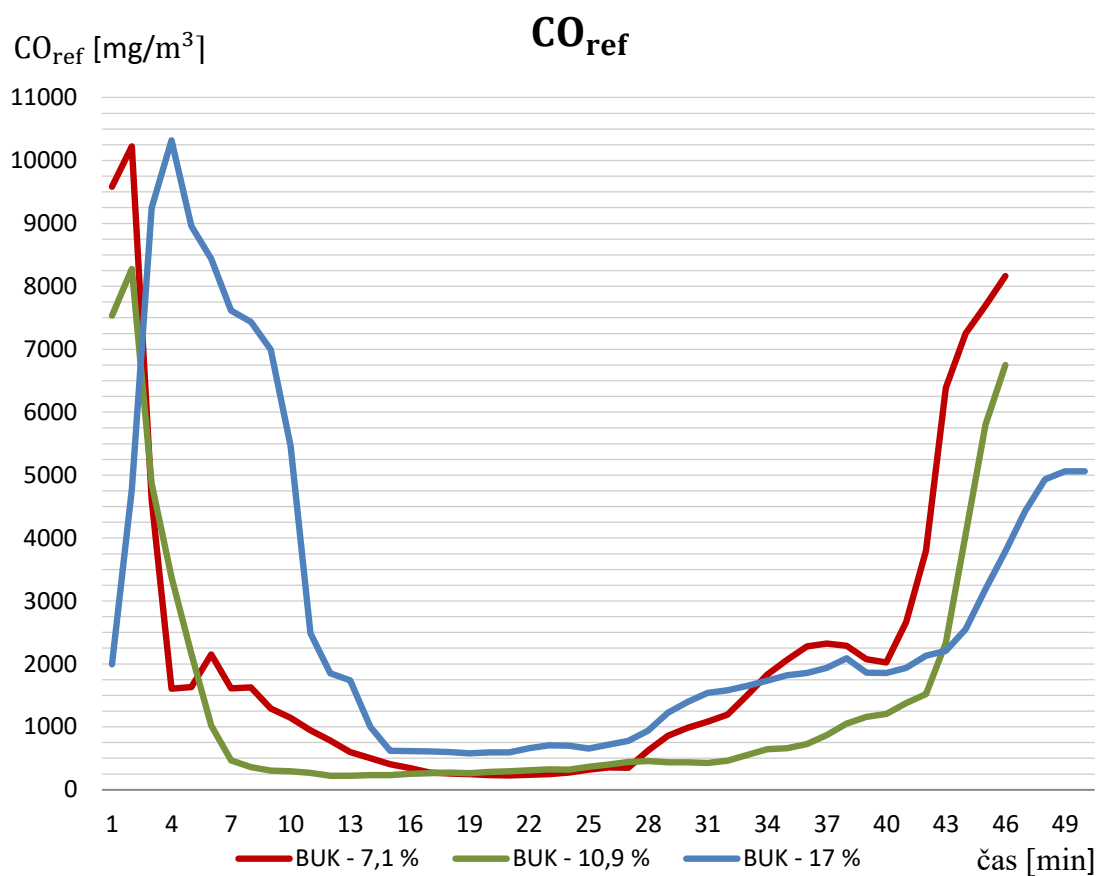
Obr. 15 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 17 %



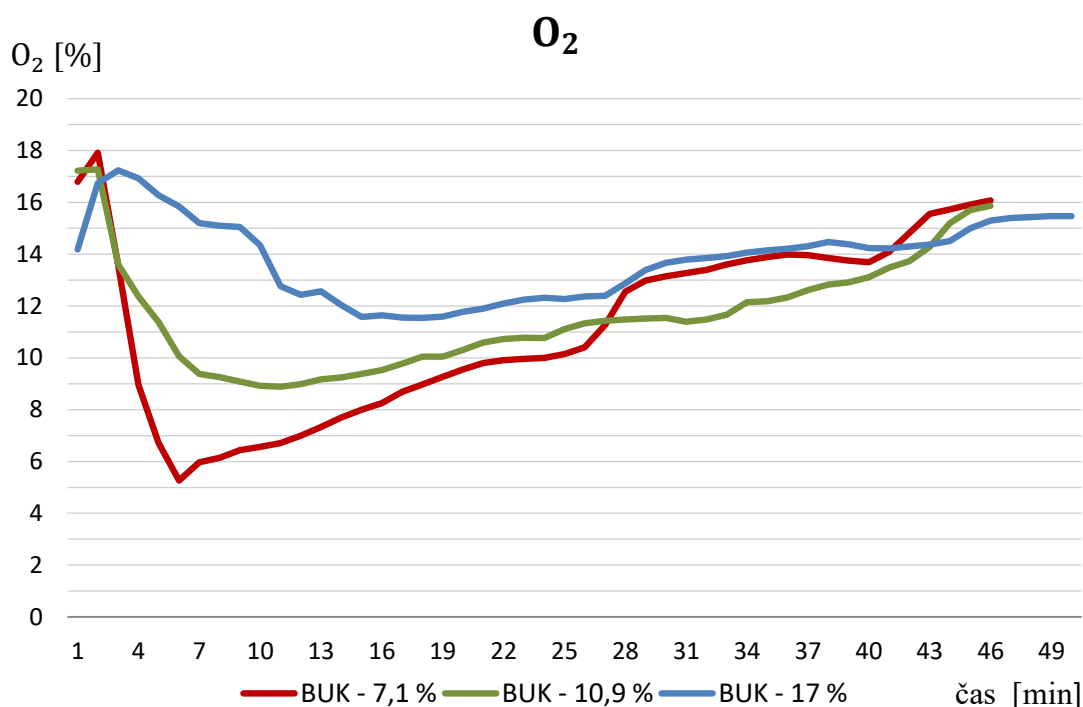
Obr. 16 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 17 %



Obr. 17 – Graf referenčních hodnot NO všech vzorků



Obr. 18 – Graf referenčních hodnot CO všech vzorků



Obr. 19 – Graf množství O<sub>2</sub> ve spalinách všech vzorků

Pro jednodušší a přehlednější porovnání výsledků měření byla sestavena tabulka průměrných hodnot pro jednotlivá měření a testovaná paliva (viz tab. 7).

Palivo – vlhkost [%]		NO [mg/m <sup>3</sup> ]	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	NO <sub>ref</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>ref</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]
Buk – 7,1 %	1.	213,6	2236,2	11,16	181,2	2540,5
	2.	218,4	1556,7	11,25	183,7	1803,3
	$\bar{x}_{7,1\%}$	<b>216,9</b>	<b>1896,5</b>	<b>11,20</b>	<b>182,3</b>	<b>2155,6</b>
Buk – 10,9 %	1.	205,1	1103,8	11,5	174,5	1303,8
	2.	199,6	1239,4	11,81	175,7	1557,1
	$\bar{x}_{10,9\%}$	<b>202,4</b>	<b>1171,8</b>	<b>11,65</b>	<b>174,8</b>	<b>1403,0</b>
Buk – 17 %	1.	162,5	1858,5	14,02	189,3	2778,2
	2.	161,6	2422,5	13,69	177,5	3145,6
	$\bar{x}_{17\%}$	<b>162,0</b>	<b>2140,5</b>	<b>13,85</b>	<b>183,0</b>	<b>2869,8</b>

Tab. 7 – Výsledné průměrné hodnoty všech měření

## 8.4 Emisní třídy a limity

Rozdělením do emisních tříd a testováním krbových vložek se zabývá norma ČSN EN 13229. Tato norma je v české legislativě plně zakotvena a vztahuje se k ní tedy certifikace krbových vložek určených pro tuzemský trh.

Třída CO spotřebiče	Spotřebiče s uzavřenými dvířky	
	Mezní hodnoty tříd emisí CO (při $O_{2,ref} = 13\%$ )	
	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]
Třída 1	$\leq 0,3$	$\leq 3\,750$
Třída 2	$> 0,3 \leq 1,0$	$> 3\,750 \leq 12\,500$

Tab. 8 – Výňatek z normy ČSN EN 13229 pro krbové vložky s přepočtem z procentuálních hodnot na mg/m<sup>3</sup> [37] [38]

Jak lze vyčíst z normy (viz tab. 8), pro zařízení tohoto typu platí dělení do dvou emisních tříd podle procentuálního zastoupení emisí CO ve spalínách. Do třídy 2 se řadí zařízení emitující maximálně 1 % CO ve spektru spalin. Do ekologičtější třídy 1 spadají zařízení s emisemi CO do 0,3 %. Hodnoty jsou porovnatelné při referenční hladině kyslíku, která je pro krbové vložky stanovena na  $O_{2,ref} = 13\%$ . Emise jiných sloučenin a prachu tato norma nezahrnuje a nezávisí na nich certifikace krbových vložek.

Pro Českou republiku platí emisní limity shodné s limity unijními. Ty nařizují, pro splnění podmínek certifikace, dosažení minimálně třídy 2 normy ČSN EN 13229 při minimálně 30% účinnosti zařízení. O mnoho přísnější emisní limity pro krbové vložky platí v Německu, kde se kromě stanovené horní hranice CO 1250 mg/m<sup>3</sup> (0,1 %) posuzují na rozdíl od ČR a EU ještě prachové částice. Nejucelenější ze všech srovnávaných zemí má Rakousko, kde se při minimální účinnosti zařízení 80 % posuzuje množství CO, NO, prachu a organického uhlíku (OGC). Tento limit je v Rakousku platný pro všechna zařízení spadající do skupiny ručně obsluhovaných zařízení pro paliva na bázi dřeva. Nutno zdůraznit, že všechny tyto limitní hodnoty v oblastech, kde nabývají platnosti, platí pro certifikaci při uvedení na trh, nikoliv při revizích [38].

Srovnání platných emisních limitů krbových vložek pro emise znečišťujících látek a minimální účinnost při $O_{2,ref} = 13\%$ (při certifikaci)					
místo platnosti	CO	NO	OGC	prach	min. účinnost
	[mg/m <sup>3</sup> ]				[%]
EU	12 500	—	—	—	30
ČR	12 500	—	—	—	30
Německo	1 250	—	—	40	75
Rakousko	1 575	215	115	86	80

Tab. 9 – Srovnání platných emisních limitů pro certifikaci krbových vložek v ČR, EU a některých vybraných zemích Evropy [38]

## 8.5 Vyhodnocení

Z výsledků měření vychází, že neoptimálnějším palivem bylo bukové dřevo s vlhkostí 10,9 %, a to i přesto, že mezi zkoušenými vzorky bylo palivo sušší. Při pohledu na obrázky 17 a 19 je v první třetině intervalu jasně patrná vysoká intenzita hoření u vzorku s vlhkostí 7,1 % s malým přebytkem  $O_2$  a nízkou produkcí emisí NO. Ve zbytku časového intervalu se intenzita spalovacího procesu u prvního vzorku výrazně snižuje a za snižujících se teplot v topeništi se zvyšuje koncentrace CO ve spalínách. Palivo také začíná hořet s větším přebytkem vzduchu, což zapříčiní výskyt většího množství NO ve spektru spalín. Hodnoty emisí dokonce na některých místech převyšují hodnoty nejvlhčího ze všech vzorků. Teploty spalín pro lepší analýzu výsledků sice nebyly k dispozici, nicméně průběh spalovacího procesu a jeho intenzita je snadno odhadnutelná i bez těchto údajů.

Při pohledu na srovnávací tabulku (viz tab. 7) je u vzorku s vlhkostí 7,1 % nepoměrně vyšší množství emisí CO v 1. měření. Jednalo se vůbec o první z šesti spalovacích zkoušek a proto je nejpravděpodobnější vysvětlení to, že obložení topeniště nebylo dostatečně zahřáté. Nic se však nemění na faktu, že spalováním dřeva s vlhkostí 7,1 % se do ovzduší emitovalo více emisí CO než v případě dřeva s vlhkostí 10,9 %.

Dřevo s vlhkostí 10,9 % mělo na všech grafech nejméně rozkolísaný průběh. Při jiném nastavení přívodu vzduchu by výsledky mohly dopadnout odlišně, nicméně při tomto normovaném experimentu mělo dřevo s vlhkostí 10,9 % nejplynulejší průběh hoření ze všech vzorků a v porovnání s dalšími palivy se jevílo jako nej kvalitnější.

Nejhůř ze všech vzorků dopadlo podle předpokladů palivo s vlhkostí 17 %. Vyšší vlhkost byla při zkoušení patrná hned ze začátku, kdy se dřevo špatně rozhořovalo a bylo nutné lehce zvýšit přívod primárního a sekundárního vzduchu. Z paliva se na začátku uvolňovala vázaná voda, teprve poté hořelo srovnatelně s předchozími dvěma vzorky. To se promítlo i v délce hoření. Zatímco u sušších vzorků palivo již ke konci měřeného intervalu téměř nehořelo, dřevo s vlhkostí 17 % se spalovalo déle. Proto byl interval měření v tomto případě prodloužen o 5 minut. Při pohledu na srovnávací graf emisí  $CO_{ref}$  (obr. 18) lze konstatovat, že se míra tvorby emisí u vlhkého vzorku svými hodnotami přibližuje k prvním dvěma se zhruba 8minutovým zpožděním. To má za následek voda obsažená v palivu, která ze začátku měření přijímala měrnou tepelnou energii potřebnou pro její odpaření. V objemu spalín tak bylo oproti předešlým palivům více vodní páry, která odváděla z topeniště teplo a ochlazovala tak spalovací proces. Nižší teplota spalování v úvodu procesu společně s velkým přebytkem vzduchu mají za následek větší produkci emisí měřených sloučenin. Nutno zmínit, že po dohoření paliva s vlhkostí 17 % zbylo v topeništi větší množství tuhého zbytku než u předešlých dvou vzorků.

Po porovnání výsledků s normou ČSN EN 13229 (tab. 8) lze vyhodnotit paliva všech třech vlhkostí jako vyhovující. Krbová vložka by tak s hodnotami emisí CO u všech vzorků s přehledem spadala do emisní třídy 1 a s velkou rezervou by splnila podmínky pro certifikaci v ČR a zemích EU. Tento limit by splnila, i kdyby hodnoty CO u vzorků vzrostly několikanásobně.

V Německu by na základě naměřených emisí CO nesplnilo limit ani jedno z testovaných paliv. V Rakousku by na základě naměřených emisí CO a NO splnila limit certifikace pouze zkouška s palivem s vlhkostí 10,9 %. V Rakousku se přihlíží kromě námi měřených sloučenin i k množství prachu a OGC ve spalínách, a proto nelze říct, zda by zkouška s tímto palivem skutečně spadala do limitu. Německá a Rakouská legislativa uvádí emisní limity při mnohem

vyšší účinnosti než norma ČSN EN 13229 a s absencí teplot spalín tak nelze posoudit, zda bylo během měření této účinnosti dosaženo. V technických parametrech krbové vložky STEKO VENUS 12.1 je uvedeno, že při účinnosti 92 % je množství emisí CO ve spalínách po přepočtu na referenční hladinu kyslíku 0,1 %, tedy 1 250 mg/m<sup>3</sup> [36]. Při těchto hodnotách by splnila emisní limity potřebné k certifikaci pro německý trh. Z experimentu vyplývá, že u nejlepšího ze všech paliv, dřeva o vlhkosti 10,9 %, převyšují hodnoty CO tento limit pouze o 153 mg/m<sup>3</sup>. Při úpravách přívodu vzduchu by bylo těchto limitů pravděpodobně dosaženo. Experiment tedy s určitostí nepotvrzuje údaje uvedené v technických parametrech krbové vložky STEKO VENUS 12.1. Protože však nejsme schopni doložit účinnost zařízení během experimentu, nelze tyto údaje zpochybnit.

Ve srovnání s Německem a Rakouskem je legislativa České republiky, co se týče emisních limitů pro krbové vložky, výrazně pozadu. Velká většina zařízení na českém trhu tak s velkou rezervou splňuje nenáročné emisní limity, které ani z části neodpovídají ekologickým trendům poslední doby. O krbových vložkách bez vodních výměníků se nezmiňují ani směrnice zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. Zpřísnění tuzemských emisních limitů pro certifikaci krbových vložek by proto nutně nemuselo uškodit naprosté většině prodejců, jejichž produkty emisní limity platné v ČR s přehledem splňují a jsou mnohdy koncipovány pro zahraniční trhy (např. německý) s mnohem přísnějšími emisními limity. Zároveň by se však eliminoval prodej neekologických či málo ekologických zařízení, což by mohlo do budoucna přispět ke zlepšení kvality ovzduší v České republice [39].



## 9 Závěr

Množství emisí škodlivých látek a prachu rozhoduje o tom, zda je daný spalovací proces ekologický či nikoliv. Jejich zvýšené množství v ovzduší lze rozpoznat pomocí lidských smyslů téměř okamžitě po jejich zvýšení. Především v zimním období se lokální topeniště nemalou měrou podílí na vzniku smogové situace. Nekvalitní spalování je rozeznatelné na barvě i zápachu kouře a takový zdroj se může stát obtěžující, ba dokonce zdravotním rizikem pro své okolí. Z dlouhodobého hlediska se pak některé plyny mohou podílet na změnách klimatu. O kvalitě paliva rozhoduje mimo jiné i voda obsažená v palivu, na kterou jsem se zaměřil v této bakalářské práci.

Cílem práce bylo zpracovat rešerši na spalování biomasy se zaměřením na vliv vlhkosti a provést základní spalovací zkoušky. Výsledky spalovacích zkoušek byly vyhodnoceny mimo jiné i s vlivem vlhkosti a srovnány s platnými emisními limity. V úvodní teoretické části byl vysvětlen pojem biomasa v kontextu tuhých paliv a spalování biomasy. Práce se zabývala emisemi vzniklými spalováním biomasy a faktory ovlivňující jejich produkci, převážně pak vlhkostí. Informace byly většinou vztahovány k lokálním topeništím a dřevu jako palivu, popř. palivům na bázi dřeva. V experimentální části byl popsán postup spalovacích zkoušek při spalování bukového dřeva o různých vlhkostech v krbové vložce. Výsledky byly řádně vyhodnoceny z hlediska působících vlivů, zejména vlhkosti, a porovnány s platnými emisními normami.

palivo – vlhkost [%]	NO [mg/m <sup>3</sup> ]	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]	NO <sub>ref</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>ref</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]
Buk – 7,1 %	216,9	1896,5	11,20	182,3	2155,6
Buk – 10,9 %	202,4	1171,8	11,65	174,8	1403,0
Buk – 17 %	162,0	2140,5	13,85	183,0	2869,8

Tab. 10 – Výsledné průměrné hodnoty testovaných paliv

Vlhkost má na výsledné hodnoty emisí škodlivých látek jasně prokazatelný vliv. Obecně je tento vliv negativní, nicméně měření prokázalo, že může v omezené míře a za určitých podmínek pozitivně působit na plynulost spalovacího procesu. Při certifikaci krbové vložky to tak může přispět k lepším výsledkům. Zatímco u sloučenin dusíku se změna vlhkosti tolik neprojevila, emise CO vzrostly, se zvýšením vlhkosti ve dřevě o 7 %, na více než dvojnásobek původní hodnoty. Kromě odlišných hodnot ve spektru spalin bylo vlhčí dřevo hůř zápalné a v topeništi po něm zůstalo větší množství tuhého zbytku. Při porovnání s normou ČSN EN 13229 spadá krbová vložka STEKO VENUS 12.1, na které byl experiment prováděn, s přehledem do třídy 1 a převyšuje tak několikanásobně nároky na certifikaci pro český trh i trh EU. Jen při zkoušce s palivem o vlhkosti 10,9 % by krbová vložka splnila certifikační limity v Rakousku. V Německu by pak nastavené limity ani s tímto palivem těsně nesplnila. Tyto výsledky však nelze kvůli absenci teplot spalin prezentovat s určitostí. V porovnání legislativních požadavků je na první pohled viditelné, že české emisní limity nekladou na certifikaci krbových vložek téměř žádné nároky. Nebylo by tedy na škodu, emisní limity určené pro krbové vložky uváděné na český trh zpřísnit a přiblížit se tak ekologické politice našich západních sousedů. Eliminovat by to prodej špatně konstruovaných a neekologických zařízení na tuzemském trhu a mohlo by tak nepatrně přispět ke zlepšení kvality ovzduší. Na té se lokální topeniště v obydlených oblastech výraznou měrou podílí, zejména pak v zimních měsících.



## Použité zdroje

- [1] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447707
- [2] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5
- [3] BUFKA, Aleš. Brikety a pelety z biomasy v roce 2007: Výsledky statistického zjišťování. In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR* [online]. Praha, 2008 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/36691/41024/488876/priloha001.pdf>
- [4] STUPAVSKÝ, Vladimír. O vytápění biomasou od A až do Z. In: *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/peletky/8814-o-vytapeni-biomasou-od-a-az-do-z>
- [5] HORÁK, Jiří a kolektiv. Proč sušit dřevo a učit lidi topit?: Vliv vlhkosti dřeva a obsluhy na emise znečišťujících látek. In: *TZB-info* [online]. 2014 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapani/10940-proc-susit-drevo-a-ucit-lidi-topit>
- [6] HORÁK, Jiří a Petr KUBESA. O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1). In: *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [7] KUBESA, Petr a Jiří HORÁK. Proces hoření kusového dřeva. In: *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8716-proces-horeni-kusoveho-dreva>
- [8] Renewable Energy. In: *The university of Iowa* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://www.facilities.uiowa.edu/uem/renewable-energy/>
- [9] Vlhkost dřeva. *Mendelova univerzita v Brně* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9177](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9177)
- [10] POLÁŠEK, Marek. Dřevo v sauně je most do přírody. In: *Dřevarský ústav/Timber institute* [online]. 2015 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.vvud.cz/drevo-v-saune-je-most-do-prirody/>
- [11] ZÁRYBNICKÁ, Michaela. Biomasa: Obnovitelný zdroj energie. In: *Západočeská univerzita v Plzni - Katedra energetických strojů a zařízení* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old\\_web/\\_files/projekty/enazp/13/IUT/063\\_Biomasa\\_-\\_Obnovitelný\\_zdroj\\_energie\\_-\\_Zarybnicka\\_-\\_P1.pdf](http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/13/IUT/063_Biomasa_-_Obnovitelný_zdroj_energie_-_Zarybnicka_-_P1.pdf)
- [12] BALÁŠ, Marek, MOSKALÍK, Jiří: Měření vlhkosti paliv. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“, VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2
- [13] CHEN, L. - V. A a kolektiv. Moisture effects on carbon and nitrogen emission from burning of wildland biomass. In: *Atmospheric chemistry and physics* [online]. Reno, USA, 2010 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.atmos-chem-phys.net/10/6617/2010/acp-10-6617-2010.pdf>
- [14] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle – 1. část. In: *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>

- [15] DUFKA, Jaroslav. Kotle na tuhá paliva do 50 kW (II) - přehled trhu v ČR. In: *TZB-info* [online]. 2001 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/659-kotle-na-tuha-paliva-do-50-kw-ii-prehled-trhu-v-cr>
- [16] Slokov Variant [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.slokov.cz>
- [17] *ATMOS* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.atmos.eu/>
- [18] *AM ENERGO: KOTLE NA DŘEVO AM ENERGO* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.agromechanika.cz/>
- [19] *Litinové krbové vložky Uniflam*. 28s. 2011. Dostupné z: [http://www.krbylevne.cz/editor/image/eshop\\_products\\_files/katalog-uniflam\\_cz\\_en.pdf](http://www.krbylevne.cz/editor/image/eshop_products_files/katalog-uniflam_cz_en.pdf)
- [20] HRDLIČKA, Jan. Biomasa a uhlí v kotlích malých výkonů. In: *TZB-info* [online]. 2014 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11527-biomasa-a-uhli-v-kotlich-malych-vykonu>
- [21] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. Zplyňování – principy a reaktory. In: *TZB-info* [online]. 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [22] HORÁK, Jiří a kol. Jak si doma stanovit vlhkost a výhřevnost dřeva? In: *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/9300-jak-si-doma-stanovit-vlhkost-a-vyhrevnost-dreva>
- [23] LYČKA, Zdeněk. Jak vybírat nový kotel na pevná paliva (1). In: *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9798-jak-vybirat-novy-kotel-na-pevna-paliva-1>
- [24] BALÁŠ, Marek a Hugo ŠEN. *NEGATIVNÍ VLIVY ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ BIOMASY - EMISE* [online]. Brno, 2006, s8 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [www.eu.fme.vutbr.cz/file/199\\_1\\_1/](http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/199_1_1/)
- [25] *MOJEKAMNA* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [www.mojekamna.cz](http://www.mojekamna.cz)
- [26] ČSN EN 13229: *Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva - Požadavky a zkušební metody*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2002.
- [27] HORÁK, Jiří a kol. Jaké parametry musí splnit kamna, krbové vložky a sporáky? Legislativa v ČR a Evropě. In: *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9983-jake-parametry-musi-splnit-kamna-krbove-vlozky-a-sporaky-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [28] *Zákon o ochraně ovzduší*. In: 2012, č. 201/2012 Sb. Dostupné také z: [http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0/%24file/Z%20201\\_2012.pdf](http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0/%24file/Z%20201_2012.pdf)
- [29] In: *World energy council* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://www.worldenergy.org/data/resources/resource/biomass/>
- [30] VOBOŘIL, David. Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. In: *OENERGETICE.CZ* [online]. 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [31] *ROMOTOP* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [www.romotop.cz](http://www.romotop.cz)

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Složení hořlaviny vybraných paliv[6].....	18
Obr. 2 – Neutrální cyklus oxidu uhličitého v biomase [8] .....	21
Obr. 3 – Závislost výhřevnosti dřeva na vlhkosti [20] .....	26
Obr. 4 – Snížení obsahu vody zasoučasného zvýšení výhřevnosti dřeva během sušení [6] ....	31
Obr. 5 – Princip spalování v prohořivacím (vlevo) a odhořivacím kotli (vpravo) [23] .....	34
Obr. 6 – Princip spalování ve zplyňovacím (vlevo) a automatickém kotli (vpravo) [23].....	34
Obr. 7 – Krbová vložka STEKO VENUS 12.1 s kouřovodem se sondou pro měření spalin ..	37
Obr. 8 – Schéma krbové vložky STEKO VENUS 12.1 s popisem jednotlivých součástí [36]	38
Obr. 9 – Analyzátor spalin s obrazovkou vykreslující měřené veličiny v průběhu procesu....	39
Obr. 10 – Sondy pro analýzu spalin na boční straně kouřovodu.....	39
Obr. 11 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 7,1 % ....	41
Obr. 12 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 7,1 % ....	41
Obr. 13 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 10,9 % ..	42
Obr. 14 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 10,9 % ..	42
Obr. 15 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 17 % .....	43
Obr. 16 – Graf jednotlivých měření a jejich průměrných hodnot – dřevo s vlhkostí 17 % .....	43
Obr. 17 – Graf referenčních hodnot NO všech vzorků .....	44
Obr. 18 – Graf referenčních hodnot CO všech vzorků .....	44
Obr. 19 – Graf množství O <sub>2</sub> ve spalinách všech vzorků .....	45



## Seznam tabulek

Tab. 1 – Hrubý rozbor paliva (pro surové uhlí) [14].....	17
Tab. 2 – Měření emisí suchého a mokrého smrkového dřeva [5] .....	27
Tab. 3 – Parametry tří vybraných kotlů [16] [17] [18].....	35
Tab. 4 – Parametry tří vybraných krbových vložek [25] [31] [19] .....	36
Tab. 5 – Technické údaje krbové vložky STEKO VENUS 12.1 předepsané výrobcem [36] .	39
Tab. 6 – Okolní podmínky v průběhu měření .....	40
Tab. 7 – Výsledné průměrné hodnoty všech měření .....	45
Tab. 8 – Výňatek z normy ČSN EN 13229 pro krbové vložky [37] [38] .....	46
Tab. 9 – Srovnání platných emisních limitů pro certifikaci krbových vložek v Evropě [38]...	46
Tab. 10 – Výsledné průměrné hodnoty testovaných paliv .....	49





## Seznam použitých symbolů a zkratk

TAP		Tuhá alternativní paliva
$h$	[%hm]	Hmotnostní obsah hořlaviny v palivu
$A^r$	[%hm]	Hmotnostní obsah popeloviny v palivu
$W^r(W)$	[%hm]	Hmotnostní obsah vody v palivu
TZL		Tuhé znečišťující látky
PAU (PAH)		Polyaromatické uhlovodíky
$Q_s$	[kJ/kg]	Spalné teplo
$Q_i^r$	[kJ/kg]	Výhřevnost
$V$	[kJ/K]	Vodní hodnota kalorimetru
$G$	[kg]	Hmotnost paliva
$r$	[kJ/kg]	Měrné výparné teplo
$H_u$	[MJ/kg]	Skutečná výhřevnost paliva
$H_{uWf}$	[MJ/kg]	Výhřevnost sušiny
$R$	[kJ]	Výparné teplo
POPs		Persistentní organické polutanty
PCDD		Dibenzodioxiny
PCDF		Dibenzofurany
MH		Mez hygroskopicity
MNBS		Mez nasycení buněčných stěn
OGC		Organický uhlík
$W_d$	[%]	Dřevařská vlhkost
$m_1$	[kg]	Hmotnost vlhkého vzorku
$m_2$	[kg]	Hmotnost suchého vzorku
$W_e$	[%]	Energetická vlhkost
$K\beta V$	[ – ]	Koeficient sesychání
$X_{ref}$	[mg/m <sup>3</sup> ]	Referenční hodnota plynu
$X$	[mg/m <sup>3</sup> ]	Aktuální hodnota plynu
$O_{2,ref}$	[%]	Referenční hodnota kyslíku
$O_2$	[%]	Aktuální hodnota kyslíku
$NO_{ref}$	[mg/m <sup>3</sup> ]	Referenční hodnota NO
$CO_{ref}$	[mg/m <sup>3</sup> ]	Referenční hodnota CO